

Carl Sagan, científico americano, incansable promotor de la investigación planetaria, es también el principal defensor de la posibilidad de comunicación con civilizaciones de otros mundos. Nació en Nueva York en 1934, se formó en la Universidad de Chicago y ha sido profesor en las Universidades de Stanford y Harvard. Es autor de numerosas obras, entre las que destacan *La vida inteligente en el Universo* (1966), *Exploración planetaria* (1970), *Un debate científico* (1972), *Comunicación con inteligencias extraterrestres* (1973), *Marte y la mente humana* (1973), *Otros mundos* (1975) y *Los dragones del Edén* (1977), y de multitud de trabajos y artículos. Obtuvo el Premio Pulitzer en 1978.

El hombre ha avanzado mucho en el camino del conocimiento de sí mismo y de su situación en el universo. Y por primera vez se da cuenta de que está o puede estar en condiciones para entrar en contacto con seres de otros mundos. Esta búsqueda de seres dotados de inteligencia igual o superior a la nuestra en otros lugares del universo constituye una cuestión fundamental, no sólo desde el punto de vista científico sino filosófico y humano. Supone una posibilidad de situar a la humanidad en un contexto cósmico y así dar un paso más en la resolución del eterno problema de quiénes somos, de dónde venimos y qué nos reserva el futuro: un futuro en un universo más amplio de lo que nuestros antepasados podían soñar, tanto en extensión como en duración.

Este libro contiene las ponencias y conclusiones de un congreso que se celebró en 1971, en la Armenia soviética, y en el que destacados científicos de todo el mundo expusieron sus conocimientos y opiniones sobre la comunicación con inteligencias extraterrestres. La obra, a cargo de Carl Sagan —que ha reunido y elaborado los materiales de dicho congreso—, constituye una exposición completa del estado actual de las investigaciones sobre el posible contacto con seres inteligentes de otros mundos y un punto de partida para cualquier estudio futuro sobre la materia.

Carl Sagan

Un paso más en la búsqueda de un futuro en un universo más amplio de lo que nuestros antepasados pudieron soñar

Comunicación con inteligencias extraterrestres

Sudamericana-Planeta

Comunicación con inteligencias extraterrestres

Comunicación con inteligencias extraterrestres

Recopilación e introducción de
CARL SAGAN

Planeta
Edición especial
para su comercialización
a través de
Sudamericana / Planeta

COLECCIÓN DOCUMENTO
Dirección: Rafael Borràs Betriu
Consejo de Redacción: María Teresa Arbó, Marcel Plans, Carlos Pujol y Xavier Vilaró

Título original: Communication with extraterrestrial intelligence (CETI)
Traducción del inglés por Ramón Carbó y Miquel Torres

Editorial Planeta, S. A., Córcega, 273-277, Barcelona-8 (España)
Diseño colección y cubierta de Hans Romberg (foto Salmer y realización de Jordi Royo)
Primera edición: agosto de 1984
Depósito legal: B. 10194 - 1980
ISBN 84-320-3551-3
ISBN 950-37-0073-6
Hecho el depósito que previene la ley 11.723
Impreso en Argentina

Índice

Apéndices

PREFACIO

Los procesos de la evolución biológica, a lo largo de un período de más de dos mil millones de años, dieron origen al Homo sapiens. *Como sugiere el nombre, la característica principal que le distingue de todos los demás seres es la «inteligencia», posibilitada por un cerebro que consta de unos diez mil millones de neuronas, cada una de las cuales posee docenas, incluso centenares de contactos funcionales con otras neuronas. La evolución biológica del hombre, desde la aparición del* Homo sapiens, *ha cesado en lo esencial, pero su evolución tecnológica ha proseguido con rapidez y ha ampliado sus capacidades motoras desde la carrera y la escalada a los submarinos, los aviones de reacción y las cápsulas espaciales, desde el garrote hasta las fundiciones gigantes y los electroimanes así como los micromanipuladores y la fabricación de circuitos microintegrados; ha ampliado su capacidad comunicadora desde los gruñidos hasta el lenguaje, la imprenta y la pantalla de televisión; mientras que su capacidad sensora se ha extendido hasta incluir todo el espectro electromagnético, hasta la percepción de acontecimientos en una escala que va desde el interior del núcleo atómico hasta los vastos dominios del cosmos. El hombre, con estos medios, se ha convertido en la más adaptable de todas las especies terrestres, y habita con éxito en un nicho ecológico formado por el planeta entero. Su cerebro tenía una estructura completa ya en el hombre de Cromagnon y no ha evolucionado más, pero también ha adquirido poderosos accesorios externos, principalmente memoria, en forma de documentos impresos y de la ayuda computadora y de proceso de datos de los «computadores» que ha inventado. Quizá sea lamentable pensar que estos mismos logros de su cerebro han eliminado las mismas presiones que en otras circunstancias podían haber fomentado su posterior evolución biológica.*

El hombre ha avanzado mucho por el camino de la comprensión propia y de la comprensión de su situación en el universo físico. Y por primera vez se da cuenta de que está o puede estar en disposición de construir los instrumentos con que iniciar la búsqueda de la existencia de otros seres de igual o superior inteligencia en alguna parte de ese universo. La conferencia reproducida en este volumen es significativa en parte por sus logros a este respecto, pero principalmente por el hecho histórico de su misma celebración, que constituye un punto recordable en la historia de la humanidad.

PHILIP HANDLER, presidente
Academia Nacional de Ciencias
(Washington, D.C.)

INTRODUCCIÓN

Éstas son las actas de una importante conferencia sobre un tema que hace sólo unos pocos años se habría considerado de impensable discusión científica: La Comunicación con inteligencias extraterrestres (Communication with Extraterrestrial Intelligence: CETI). Sin embargo, nuestro conocimiento actual de las ciencias físicas y biológicas nos hace suponer, por lo menos a muchos de nosotros, que las posibilidades de que exista una inteligencia extraterrestre son mucho mayores de lo que pensaban los científicos de hace sólo unas décadas. Por otra parte, no hay lugar a dudas de que el nivel de avance tecnológico en el planeta Tierra en las últimas décadas ha sido tan espectacular, que disponemos potencialmente de los medios para entrar en contacto con inteligencias extraterrestres. Hasta que se produzca este contacto real, el tema estará envuelto en incertidumbre, y permitirá honestas diferencias de opinión. Pero no creo que ningún estudioso serio del tema soslaye su importancia: tanto para la ciencia como para las más profundas cuestiones filosóficas y humanas. Esta búsqueda de inteligencias extraterrestres constituye en un sentido muy real la búsqueda de un contexto cósmico para la humanidad, una búsqueda sobre quiénes somos, de dónde venimos y qué posibilidades nos reserva el futuro: un futuro en un universo más amplio de lo que nuestros antepasados hubieran podido soñar, tanto en extensión como en duración.

La idea de esta conferencia tuvo su origen en unas discusiones celebradas a partir de 1967 en varias ciudades del mundo, entre ellas Moscú, Praga, Nueva York y Washington. Las discusiones iniciales tuvieron lugar entre N. S. Kardashev e I. S. Shklovsky en la Unión Soviética; Philip Morrison, Frank Drake y yo mismo en los Estados Unidos; y Rudolf Pešek en Checoslovaquia. El profesor Pešek, la Federación Astronáut

ca Internacional y la Academia Checa de Ciencias se ofrecieron para dar cobijo a esta reunión. Las cosas siguieron otro curso, pero les agradecemos los importantes y tempranos esfuerzos que realizaron para que la reunión tuviera lugar. La conferencia en sí fue patrocinada conjuntamente por la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos de América y por la Academia de Ciencias de la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas. La Fundación de la Ciencia Nacional proporcionó ayuda a los participantes de los Estados Unidos. En los Estados Unidos, jugaron un papel importante en la organización del encuentro Harrison Brown, secretario exterior de la Academia Nacional, Robert Forcey y Jesse Mitchell. Reconocemos y agradecemos también el apoyo material y moral de Philip Handler, presidente de la Academia Nacional de Ciencias. La hospitalidad de nuestros anfitriones soviéticos fue muy gentil desde que llegó a Moscú la mayor parte de nosotros hasta la salida de la mayoría de nosotros; y en la República Socialista Soviética de Armenia la hospitalidad del académico V. A. Ambartsumian y de su equipo fue esencial para el éxito del congreso. G. S. Khromov, vicepresidente del Consejo Astronómico de la Academia de Ciencias de la URSS ayudó al envío de los manuscritos corregidos por los participantes soviéticos.

La transcripción estenotípica de la conferencia –el material fundamental en que se basan las actas publicadas– fue realizada por la señora Fly Swanson; nunca alabaremos bastante su cuidado y la escrupulosa atención a los detalles. La participación de la señora Swanson fue posible gracias a un fondo especial proporcionado por el doctor Hans Mark, director del Ames Research Center, Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio. Sin la oportuna ayuda del doctor Mark, estas actas no hubiesen sido posibles. La señora Phyllis Morrison controló un elaborado sistema múltiple de grabación magnetofónica y es también la autora de casi todo el sincero material fotográfico incluido en este volumen. Estamos muy agradecidos a la señora Morrison por sus importantes contribuciones al éxito de la conferencia.

Creo que no cometeré injusticia con los demás participantes si digo que la piedra angular del éxito fue Boris Belitsky, director científico de los programas en lengua inglesa de Radio Moscú. Todos los participantes en la conferencia con quienes he hablado aseguran que el señor Belitsky es con mucho el más claro, diestro y competente traductor científico instantáneo tanto del inglés al ruso como del ruso al inglés. De hecho

en varias ocasiones corrigió deslices estilísticos o científicos en ambos idiomas. Parece que un requisito previo para establecer una comunicación inteligible con inteligencias extraterrestres es conseguir una comunicación inteligible entre inteligencias terrestres. La buena voluntad de los participantes y los esfuerzos del señor Belitsky hicieron posible estos intercambios terrestres entre individuos de diferentes orígenes, nacionalidades, lenguas y disciplinas científicas.

Las reuniones se celebraron en la sala principal de conferencias del Observatorio Astrofísico de Byurakan de la Academia Armenia de Ciencias. Los comités organizadores soviético y americano y unos pocos participantes más se alojaron en el Observatorio; los demás participantes en la cercana Yerevan, capital de la RSS de Armenia. Cada día podíamos contemplar el monte Ararat, donde se dice que tocó tierra el Arca de Noé. Freeman Dyson, en el *New Yorker* del 6 de noviembre de 1971, p. 126, y William H. McNeill en el *Chicago Magazine*, mayo-junio de 1972, publicaron simpáticos informes personales sobre los aspectos no científicos (e incluso científicos) de este congreso. En la prensa soviética se publicaron también numerosos artículos sobre la reunión.

La forma de las discusiones consistió en una presentación inicial de un tema por un guía de la discusión y luego en un panorama vivo y vigoroso de comentarios, críticas y asociaciones libres. Los presidentes de las diversas sesiones fueron Ambartsumian, Crick, Gold, Kaplan, McNeill, Orgel, Pešek, Sagan, Shklovsky y Troitsky. La serie de temas, desde los más especulativos a los más concretos, aparece en el índice y sigue de cerca el orden real de discusión en la reunión. Algunas de las discusiones, en bien de la claridad, se han cambiado de lugar para que sus antecedentes sean más claros. Se incluye aquí todo el contenido del encuentro con excepciones de poca monta. Debido al amplio espectro de conocimientos humanos relevantes para el tema de CETI y debido también al entusiasmo de los participantes, algunas sesiones se prolongaron desde primeras horas de la mañana hasta horas avanzadas de la noche, obligando a un esfuerzo desusado a los participantes, estenotipistas y traductores.

Se publicó en forma de comunicado un conjunto de recomendaciones y conclusiones de la conferencia, que fue elaborado tras un trabajo de muchas horas por un pequeño grupo que incluía a los doctores Kardashev, Shklovsky, Gindilis, Troitsky y Kaplan de la Unión Soviética y a Drake, Morrison y yo mismo de los Estados Unidos. El señor Belitsky tuvo un

papel activo en estas discusiones. El borrador de la resolución de los comités organizadores se sometió a discusión frase por frase en una reunión plenaria celebrada el último día de la conferencia, en la que todos los participantes presentes tenían derecho a veto. El comunicado reproducido aquí representa, pues, un punto de vista al que todos los participantes podían adherirse, aunque había una amplia mayoría partidaria de votar por una declaración más fuerte en favor de la probabilidad de que existan inteligencias extraterrestres. El comunicado, que en cierto sentido constituye un resumen de las actas de la conferencia y en cierto sentido constituye una apertura hacia futuros estudios sobre el problema CETI, se reproduce al final de este volumen.

Los autores de las discusiones básicas han podido en general corregir la transcripción de errores de hecho o de errores de transcripción, pero se ha procurado al máximo reproducir de cerca el carácter de las discusiones, tal como tuvieron lugar. El ambiente de este debate científico creo que es casi tan interesante como el mismo tema. He leído el texto varias veces y todavía encuentro algunos pasajes en los que la fluidez y brillantez de las nuevas ideas entre los participantes resulta electrizante.

Se trata de una reproducción exacta de una discusión científica interdisciplinaria que abarca muchos temas diversos, y por lo tanto quizá no resulte una lectura del todo fácil para un lego. Sin embargo –y quizá se deba en parte a que muchos científicos son moderadamente analfabetos en los dominios que no son de su especialidad– creo que una persona lega interesada por la ciencia, pero sin una concreta formación técnica, puede comprender fácilmente la mayor parte del curso e intercambio de ideas. Algunas discusiones, por ejemplo el informe de Richard Lee sobre la evolución del hombre y el de Kent Flannery sobre los orígenes de las civilizaciones, destacan como resúmenes extraordinariamente logrados, y comprensibles para todos, de temas importantes y difíciles. Se ha incluido al final del libro un glosario de términos técnicos para ayudar al lector no iniciado, y un extenso índice para ayudar a relacionar las ideas. Algunos conceptos, como la clasificación de Kardashev de las civilizaciones extraterrestres en tipos I, II y III cada vez más avanzados o el lenguaje *Lincos* de Hans Freudenthal para la expresión interestelar, son introducidos por los participantes sin explicación previa. Del mismo modo algunas de las discusiones de los detalles de la comunicación interestelar por radio presuponen un conocimiento previo por

parte del lector. Quizá se me perdone si digo que puede obtenerse una introducción a todas estas ideas a partir del libro *Intelligent Life in the Universe* por I. S. Shklovsky y Carl Sagan (San Francisco: Holden-Day, 1966; Nueva York: Dell Publishing Company, 1967 y muchas reimpresiones). Otras obras importantes sobre el tema son *Interstellar Communication*, recopilado por A. G. W. Cameron (Nueva York: Benjamin, 1965); *We Are Not Alone* por Walter Sullivan (Nueva York: McGraw-Hill, 1964); *Extraterrestrial Civilizations*, recopilado por G. M. Tovmasyan (Erevan: Academia de Ciencias de Armenia); traducción inglesa por Z. Lerman en Israel Program for Scientific Translations, IPST 1823, 1967); *Extraterrestrial Civilizations: Problems of Interstellar Communication*, recopilado por S. A. Kaplan (en Moscú, Rusia; traducción inglesa por el Israel Program for Scientific Translations, IPST 5780, NASA Technical Translation TTF-631, 1971); y *The Cosmic Connection* por Carl Sagan (Nueva York: Doubleday, 1973). El libro de Tovmasyan está formado por las actas de una conferencia anterior celebrada sobre este tema en la Unión Soviética. En las tres primeras referencias citadas más arriba puede encontrarse un resumen de la primera conferencia sobre inteligencia extraterrestre celebrada en los Estados Unidos en 1961.

Muchos de los participantes son muy conocidos en la comunidad científica, pero quizá la mayoría de ellos no resulten familiares a una persona no iniciada. Por lo tanto, esta Introducción va seguida de una lista de participantes. Añado aquí algunas frases sobre una muestra quizá representativa de participantes. Philip Morrison hizo, junto con G. Cocconi, la primera propuesta sobre la utilización para las comunicaciones interestelares dirigidas a la Tierra de ondas de radio de 21 cm de longitud, las preferidas por el hidrógeno interestelar para emitir y absorber radiación. Frank Drake realizó la primera investigación de este tipo (sin éxito) en el proyecto Ozma. V. S. Troitsky informa en este volumen sobre un conjunto más elaborado de experimentos que siguieron a Ozma en la búsqueda de señales de civilizaciones extraterrestres. I. S. Shklovsky y N. S. Kardashev han desempeñado papeles importantes en la formación del clima teórico e intelectual que condujeron a estas investigaciones en la Unión Soviética. Charles Townes hizo la primera propuesta para la utilización de láseres en las comunicaciones interestelares. Townes recibió el Premio Nobel de Física en 1964 por el invento del máser y del láser. Francis Crick, otro escéptico laureado Nobel, es más conoci-

do, junto con J. D. Watson, por su descubrimiento de la estructura en doble hélice del ADN y por haber especificado la naturaleza del código genético. Shklovsky, V. L. Ginzburg y Thomas Gold están en primera línea mundial de la astrofísica teórica. Freeman Dyson, matemático y físico teórico, fue uno de los primeros en llamar la atención sobre las actividades de astroingeniería de las civilizaciones muy avanzadas: una probable remodelación a gran escala de su ambiente local cósmico. M. Ya. Marov, Y. K. Khodarev, y V. I. Moroz juegan papeles dirigentes en los estudios planetarios soviéticos. Richard Lee ha estudiado tanto a primates no humanos como a los bosquimanos Kung, con los cuales convivió varios años en el desierto de Kalahari. Kent Flannery es uno de los pocos arqueólogos del mundo que ha realizado importantes estudios tanto en América central como en el Oriente Próximo. Y. N. Pariisky es el director de un nuevo radio-telescopio soviético que se está construyendo en las montañas del Cáucaso, y que en parte se dedicará a CETI. W. H. McNeill es un distinguido historiador americano, autor del éxito editorial *The Rise of the West*. L. Mukhin es responsable del desarrollo soviético en instrumentación exobiológica. Marvin Minsky es un importante diseñador de máquinas con atributos que denominamos inteligentes. V. A. Ambartsumian es presidente de la Academia de Ciencias de Armenia, director del Observatorio Byurakan y miembro del Soviet Supremo. David Heeschen es director del Observatorio Radioastronómico Nacional, mientras que Drake es director del Centro Nacional de Astronomía e Ionosfera, las dos instalaciones en los Estados Unidos con las mayores antenas orientables de radio. Bernard Burke es codescubridor de las emisiones esporádicas de radio del planeta Júpiter. B. V. Sukhotin es un importante experto en el desciframiento de mensajes. Leslie Orgel ha realizado notables experimentos en la química orgánica prebiológica y ha dado origen también a una de las principales teorías del envejecimiento en los sistemas vivos. S. A. Kaplan es un experto en el medio interestelar. B. M. Oliver es un ingeniero eléctrico que dirigió un estudio en gran escala sobre un gran programa propuesto para la búsqueda de inteligencias extraterrestres, que él mismo describe en este volumen. John Platt es un físico que se ocupa principalmente de la condición humana y del modo de mejorarla. B. M. Tovmasyan es un radioastrónomo que recopiló las actas de la primera conferencia soviética sobre CETI. La intención de esta breve lista es dar una idea de la amplitud y profundidad de los participantes en la conferencia. La representación americana era proporcionalmente algo más fuerte en las ciencias biológicas y sociales que la delegación soviética. Por otra parte, la delegación soviética era a su vez más fuerte en la práctica astronómica. Pero parece que la distribución de las disciplinas fue mutuamente complementaria.

Estoy en deuda con los doctores Terrence Fine, G. G. Simpson, James Elliot, Martin Harwit y Joshua Lederberg, los cuales, aunque no pudieron asistir a la conferencia, enviaron contribuciones breves que se reproducen en los apéndices; y también con el Master del Birkbeck College por haber permitido la reimpresión del notable ensayo de Freeman Dyson *El mundo, la carne y el demonio,* que trata de uno de los muchos temas del presente volumen. Estoy muy agradecido a Mary Szymanski, Carol Smith, Marye Wanlass y JoAnn Cowan por haber pasado a máquina el manuscrito de estas actas. Su dedicación fue apoyada en parte por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio. Estas actas se publicarán también en una edición en ruso de la Editorial «Mir» en Moscú a cargo de S. A. Kaplan.

CARL SAGAN

Ithaca, Nueva York, 9 de noviembre de 1972.

PARTICIPANTES

Comité organizador soviético

V. A. AMBARTSUMIAN, presidente
Observatorio Astrofísico de Byurakan, Academia de Ciencias de Armenia.

N. S. KARDASHEV
Instituto de Investigación Cósmica, Academia Soviética de Ciencias, Moscú.

I. S. SHKLOVSKY
Instituto de Investigación Cósmica, Academia Soviética de Ciencias, Moscú; e Instituto Astronómico Shternberg, Universidad Estatal de Moscú.

V. S. TROITSKY
Instituto de Radiofísica, Universidad Estatal de Gorky, Gorky.

Comité organizador norteamericano

C. SAGAN, presidente
Centro de Radiofísica e Investigación Espacial, Universida de Cornell, Ithaca, Nueva York.

F. D. DRAKE
Centro de Radiofísica e Investigación Espacial, Universida de Cornell, Ithaca, Nueva York.

P. MORRISON
Departamento de Física, Instituto de Tecnología de Massachusetts, Cambridge, Massachusetts.

Participantes soviéticos

S. Y. BRAUDE
Instituto de Radiofísica y Electrónica, Academia de Ciencias de Ucrania, Kharkov.

E. M. DEBAI
Instituto Astronómico Shternberg, Universidad Estatal de Moscú.

L. M. GINDILIS
Instituto Astronómico Shternberg, Universidad Estatal de Moscú.

V. L. GINZBURG
Instituto Físico Lebedev, Academia Soviética de Ciencias, Moscú.

G. M. IDLIS
Instituto Astrofísico, Academia de Ciencias de Kazakhistán, Alma-Ata.

S. A. KAPLAN
Instituto de Radiofísica, Universidad Estatal de Gorky, Gorky.

V. V. KAZUTINSKY
Instituto de Filosofía, Academia Soviética de Ciencias, Moscú.

E. E. KHACHIKYAN
Observatorio Astrofísico de Byurakan, Academia de Ciencias de Armenia, Erevan.

Y. K. KHODAREV
Instituto de Investigación Cósmica, Academia Soviética de Ciencias, Moscú.

Y. I. KUZNETZOV
Instituto de Energética, Moscú.

B. E. MARKARIAN
Observatorio Astrofísico de Byurakan, Academia de Ciencias de Armenia, Erevan.

E. S. MARKARIAN
Instituto de Filosofía y Derecho, Academia de Ciencias de Armenia, Erevan.

M. Y. MAROV
Instituto de Matemáticas Aplicadas, Academia Soviética de Ciencias, Moscú.

E. MIRZABEKIAN
Instituto de Radiofísica y Electrónica, Academia de Ciencias de Armenia, Erevan.

L. V. MIRZOYAN
Observatorio Astrofísico de Byurakan, Academia de Ciencias de Armenia, Erevan.

V. I. MOROZ
Instituto de Investigación Cósmica, Academia Soviética de Ciencias, Moscú, y Universidad Estatal de Moscú.

L. M. MUKHIN
Instituto de Investigación Cósmica, Academia Soviética de Ciencias, Moscú.

L. M. OZERNOY
Instituto de Física Lebedev, Academia Soviética de Ciencias, Moscú.

B. I. PANOVKIN
Consejo Radioastronómico, Academia Soviética de Ciencias, Moscú.

Y. N. PARIISKY
Observatorio Especial Astrofísico, Academia Soviética de Ciencias, Leningrado.

N. T. PETROVICH
Instituto de Electrotecnia y Comunicaciones, Moscú.

R. G. PODOLNY
«Conocer es Poder», Moscú.

V. A. SANAMYAN
Observatorio Astrofísico de Byurakan, Academia Armenia de Ciencias, Erevan.

V. I. SIFOROV
Instituto de Transmisión de la Información, Academia Soviética de Ciencias, Moscú.

V. I. SLYSH
Instituto de Investigación Cósmica, Academia Soviética de Ciencias, Moscú.

B. V. SUKHOTIN
Instituto de la Lengua Rusa, Academia Soviética de Ciencias, Moscú.

M. L. TER-MIKAELIAN
Observatorio Astrofísico de Byurakan, Academia de Ciencias de Armenia, Erevan.

Participantes de los Estados Unidos

B. BURKE
Departamento de Física, Instituto de Tecnología de Massachusetts, Cambridge, Massachusetts.

F. DYSON
Instituto de Estudios Avanzados, Princeton, Nueva Jersey.

K. FLANNERY
Departamento de Antropología, Universidad de Michigan, Ann Arbor.

T. GOLD
Centro de Radiofísica y de Investigación Espacial, Universidad de Cornell, Ithaca, Nueva York.

D. HEESCHEN
Observatorio Nacional de Radio Astronomía, Charlottesville, Virginia.

S. VON HOERNER
Observatorio Nacional de Radio Astronomía, Charlottesville, Virginia.

D. HUBEL
Departamento de Fisiología, Escuela Médica de Harvard, Cambridge, Massachusetts.

K. KELLERMANN
Observatorio Nacional de Radio Astronomía, Charlottesville, Virginia.

W. H. MCNEILL
Departamento de Historia, Universidad de Chicago, Chicago, Illinois.

M. MINSKY
Departamento de Ingeniería Eléctrica, Instituto de Tecnología de Massachusetts, Cambridge, Massachusetts.

B. M. OLIVER
Hewlett-Packard Corporation y Universidad de Stanford, Palo Alto, California.

L. ORGEL
Instituto Salk, La Jolla, California, y Universidad de Londres, Londres, Reino Unido.

J. R. PLATT
Centro de Salud Mental de Michigan, Universidad de Michigan, Ann Arbor.

G. STENT
Departamento de Virología, Universidad de California, Berkeley.

C. TOWNES
Departamento de Física, Universidad de California, Berkeley.

Participantes de otras naciones

F. H. C. CRICK
Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigación Médica, Universidad de Cambridge, Reino Unido.

R. B. LEE
Departamento de Antropología, Universidad de Toronto, Toronto, Ontario, Canadá.

G. MARX
Departamento de Física, Universidad de Budapest, Budapest, Hungría.

R. PEŠEK
Academia Checa de Ciencias, Praga, Checoslovaquia.

$$N = R_* f_p n_e f_l f_i f_c L$$

AMBARTSUMIAN: El comité organizador me ha pedido que haga unas cuantas notas de introducción en la apertura de esta conferencia sobre la Comunicación con inteligencias extraterrestres (CETI). Nuestra conferencia ha sido convocada por la Academia de Ciencias de la URSS y por la Academia Nacional de Ciencia de los Estados Unidos. Por lo tanto, se trata de una conferencia soviético-americana. La Academia de Ciencias de Armenia propuso celebrar la Conferencia en Byurakan y la propuesta fue aceptada. Por ello, la Academia de Armenia ha realizado una misión importante en la labor organizadora.

El comité organizador decidió mantener el carácter bilingüe de la conferencia, pero al mismo tiempo creyó oportuno enviar invitaciones personales a un reducido número de científicos seleccionados de otros países, y gracias a ello tenemos el privilegio de ver entre nosotros al doctor Crick del Reino Unido, al doctor Marx de Hungría, y al doctor Pešek de Checoslovaquia. No hay duda de que su participación nos será muy útil y valiosa.

Tanto los iniciadores de la conferencia como los organizadores son plenamente conscientes de que el tema escogido contiene muchos elementos nebulosos. Sin embargo, una cosa está clara: que por su misma naturaleza la conferencia es ampliamente interdisciplinaria. Por ese motivo era evidente que la discusión del tema en una fase como ésta, naturalmente preliminar, exigía la representación de muchas ciencias diferentes. Aunque no podíamos asegurar una representación suficientemente uniforme de todas las ciencias relacionadas con CETI, nos satisface comprobar que está presente una representación científica de un amplio campo de problemas.

Desde luego, algunos pueden pensar que una discusión sobre inteligencias extraterrestres y la comunicación con tales

inteligencias es algo prematura, porque hasta ahora no tenemos una prueba directa de la existencia de tales inteligencias. Pero los patrocinadores de la conferencia creen que hay que buscar activamente esta prueba y estudiar el problema de modo fundamental, recurriendo a todos los datos de que disponen en la actualidad la astronomía, las ciencias planetarias, la biología y las ciencias sociales.

¿Hasta qué punto nos hemos acercado a una presentación propiamente científica del problema para justificar la celebración de una conferencia tan representativa? Estoy convencido de la existencia de razones fundadas para emprender un profundo estudio del problema que nos ocupa. Pueden señalarse en este contexto los progresos conseguidos en radioastronomía, y especialmente en las técnicas para la recepción de señales débiles de fuentes cósmicas alejadas. Se han producido avances notables en este campo y creo que están mejorando continuamente las perspectivas de dar nuevos pasos adelante.

Por otra parte, la astronomía contemporánea está a punto de convertirse en una astronomía de todas las ondas. Eso aumenta nuestra capacidad para recibir posibles señales de inteligencias extraterrestres. Los avances en varias zonas de la cibernética y de la teoría de la información tendrían que hacer factible tratar el problema de los posibles canales de comunicaciones CETI y los modos de instrucción que podrían emplear civilizaciones superiores para dirigirse a otras civilizaciones en ausencia de cualquier entendimiento previo y explícito.

La biología contemporánea ha revelado algunos de los misterios de los procesos de la vida. El camino que seguimos nos permitirá analizar las diversas formas de vida e incluso los diversos mecanismos con los cuales la inteligencia se afirma a sí misma. La exploración espacial ha aumentado nuestros conocimientos sobre la Luna y los planetas. Estamos avanzando en la comprensión de sus orígenes. Todo esto ha creado una situación en la que una discusión sobre CETI puede resultar bastante fructífera. Por lo tanto, esta conferencia parece muy justificada. Aunque nuestras discusiones solamente nos permitan comprender mejor el método para enfrentarnos con el problema, no habremos perdido el tiempo.

Con anterioridad a ésta, se han celebrado otras conferencias similares con buenos resultados. Nuestros colegas americanos de la Academia Nacional de Ciencias celebraron una conferencia sobre CETI en 1961. También los científicos soviéticos se reunieron hace siete años aquí en Byurakan para celebrar su primera conferencia sobre el tema. Las actas de la

conferencia de Byurakan se publicaron en ruso, y la obra se tradujo luego al inglés.

La primera conferencia demostró claramente que la discusión de este tema entre científicos de diversos campos resultaba útil; sabemos que también en otros países hay un gran interés por este tema. Creo, por lo tanto, que el profesor Shklovsky estaba en lo cierto cuando me dijo que antes de poder resolver el problema de la comunicación con civilizaciones extraterrestres sería conveniente que se estableciese una comunicación sobre el tema entre las naciones, y éste es precisamente el objetivo de nuestra conferencia.

Todos somos conscientes de que el descubrimiento de las primeras inteligencias extraterrestres tendría consecuencias colosales para el progreso del conocimiento humano, del mismo orden de magnitud que el lanzamiento del primer Sputnik o el dominio de la energía nuclear, y ello aunque el acontecimiento no fuese tan instantáneo y sí menos espectacular. Sin embargo, puesto que un descubrimiento así podría resultar tan importante, de una importancia colosal, la mayoría de los participantes en la conferencia están muy entusiasmados por el problema; nuestros huéspedes del otro lado del océano no se amedrentaron por la distancia y dificultad del viaje.

Permítanme que dé la bienvenida a todos los que han acudido a esta conferencia, a todos los participantes. Probablemente convendrá al final de nuestra tarea trazar y aprobar unas breves conclusiones sobre el estado actual del problema. Sería también deseable que al final de la conferencia publicáramos un comunicado conjunto; permítanme, pues, que haga una observación técnica. Aquí disponemos de medios de traducción. Estamos en disposición de efectuar traducciones simultáneas, pero en la reunión del comité organizador se decidió que por lo menos los introductores de la discusión fueran traducidos primero consecutivamente a fin de disponer de una traducción más precisa y para ayudar al subsiguiente desarrollo de la discusión; de este modo la cosa será más fácil para todos. También será más fácil para los que estén en disposición de seguir ambos idiomas.

Permítanme, pues, que acabe deseándoles a todos el éxito en nuestra labor.

Quisiera ahora conceder la palabra al doctor Sagan, de Estados Unidos, para que formule unas notas introductorias.

SAGAN: Gracias, académico Ambartsumian. Apreciamos mucho su amable hospitalidad y esta elegante sala de reuniones.

La participación de los delegados de los Estados Unidos ha sido posible gracias al apoyo de la Academia Nacional de Ciencias y de la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, y el apoyo de la señora Swanson, que está efectuando una transcripción estenotípica de todas las observaciones de esta reunión para su posible publicación, ha sido pagado por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio.

La palabra CETI, que ha sido ideada para esta reunión, creo que resulta apropiada por tres razones diferentes. En primer lugar es un acrónimo de «Communication with Extraterrestrial Intelligence» (Comunicación con Inteligencias Extraterrestres). En segundo lugar es el genitivo de la palabra ballena en latín, lo cual tiene cierto interés para esta discusión; los cetáceos constituyen sin duda otra especie inteligente que habita nuestro planeta y se ha afirmado que si somos incapaces de comunicarnos con ellos también lo seremos de comunicar con civilizaciones extraterrestres. Y, finalmente, una de las dos estrellas que examinó primero Frank Drake en el Proyecto Ozma, la primera realización experimental de este tipo, fue Tau Ceti.

Se ha sugerido que para establecer un marco coherente de trabajo en algunas de las discusiones siguientes, tendríamos que expresar una formulación sobre el número de civilizaciones técnicas en la Galaxia de la Vía Láctea que están en nuestro nivel de avance tecnológico o lo superan. Tal como indica el programa, los primeros dos días y medio de esta conferencia serán dedicados a discutir estos factores constituyentes. Hay muchas formulaciones de este problema. En la formulación más sencilla, debida en su forma original a Drake, N, el número de civilizaciones de este tipo existentes en la Galaxia, se puede escribir como producto de siete factores:

$$N = R_* f_p n_e f_l f_i f_c L. \qquad (1)$$

R_* es el ritmo de formación estelar promediado para toda la vida de la Galaxia, en unidades de número de estrellas por año; f_p es la fracción de estrellas que tienen sistemas planetarios; n_e es el promedio de planetas dentro de estos sistemas planetarios que son ecológicamente apropiados a la vida; f_l es la fracción de esos planetas en los que tiene lugar realmente el origen de la vida; f_i es la fracción de tales planetas en los que, tras aparecer la vida, nace la inteligencia en alguna forma; f_c es la fracción de tales planetas en los cuales los seres inteligentes empiezan a desarrollar una fase comunicativa; y L es la vida media de esas civilizaciones técnicas.

El factor R_* pertenece al dominio de la astrofísica, como también f_p; n_e está determinado en la frontera que separa la astronomía de la biología; f_l es en gran parte un tema de la química orgánica y de la bioquímica; f_i constituye un tema de la neurofisiología y la evolución de los organismos avanzados; f_c es un tema de antropología, arqueología e historia. Y el último término está situado en una zona muy nebulosa que predeciría el futuro de las sociedades; afecta a la psicología y a la psicopatología, a la historia, la política, la sociología y otros muchos campos. La confianza de los cálculos declina pronunciadamente de R_* a L en la ecuación (1). Pero dejando aparte la posible bondad de nuestros cálculos sobre estos factores, es de notar el hecho de que exista un problema en sí que implique tan íntimamente unos temas que van desde la astrofísica y la biología molecular hasta la arqueología y la política.

La última observación que deseo formular se refiere a la naturaleza de estos factores constituyentes. Se ha planteado en diversas ocasiones la cuestión referente al sentido de una probabilidad en este contexto. Me gustaría subrayar el hecho de que el concepto de probabilidad en esta ecuación va cambiando a medida que uno pasa de R_* a L en la ecuación (1). La cuestión referente al número de estrellas formadas por unidad de tiempo en la Galaxia constituye una cantidad estadística. Se determina contando y aplicando algunas consideraciones teóricas. Hay $\sim 10^{11}$ estrellas en la Galaxia, cuya edad es de 10^{10} años; $R_* \sim 10$ estrellas/año es el único factor determinado por lo menos con una buena aproximación. Pero a medida que avanzamos nos encontramos con el problema de extrapolar a partir de unos pocos o de un único ejemplo, aparte de otras informaciones relevantes. Y finalmente cuando llegamos a L, alcanzamos un punto donde por suerte para nosotros, pero por desgracia para la discusión, no disponemos de un solo ejemplo sobre la duración de la vida de una civilización técnica. Tenemos límites, pero ningún valor absoluto para L, ni siquiera en la Tierra.

¿Qué significa, pues, determinar una probabilidad sobre el posible desarrollo de la inteligencia o sobre el posible desarrollo de una fase comunicativa? Me gustaría referirme a un artículo preparado para esta reunión (ver apéndice A) por el profesor Terrence Fine, de la Universidad de Cornell, quien acaba de escribir un libro titulado *Teorías de la probabilidad:*

examen de sus fundamentos. Señala que aparte de los cálculos de probabilidad enumerativa y los cálculos de probabilidad basados en una firme comprensión de la física subyacente, hay un tercer tipo de cálculo de probabilidad, la probabilidad subjetiva. Y me temo que nosotros nos encontramos en este punto. Fine escribe:

La interpretación subjetiva o personalista de la probabilidad asegura que los cálculos de probabilidad se derivan a través de un proceso de introspección carente en gran parte de asistencia, y que luego se aplican a la selección de decisiones o actos óptimos, como la distribución de los recursos de la investigación. El punto de vista subjetivo admite valientemente los elementos subjetivos en la mayoría de los demás conceptos de probabilidad e incluso anima al sujeto a utilizar plenamente sus juicios, creencias y experiencias informales para alcanzar un cálculo de probabilidad cuyo objetivo es efectuar una decisión y establecer una comunicación interpersonal del juicio individual, en lugar, por ejemplo, de garantizar la «verdad» de las proposiciones.

Las afirmaciones de la probabilidad subjetiva son ciertamente personales, pero no arbitrarias. Existen unos axiomas razonables de consistencia objetiva entre las afirmaciones y hay unas restricciones que obligan al usuario a aprender a partir de la experiencia de un modo razonablemente explícito. Aunque no resulte posible criticar una sola de las afirmaciones de la probabilidad subjetiva, es posible criticar un conjunto de estas afirmaciones.

Y Fine concluye con las siguientes palabras:

El punto de vista subjetivo se ha discutido y aplicado ampliamente en la formulación de decisiones directivas y en los análisis de fiabilidad. Aunque presenta limitaciones evidentes, sucede lo propio con los demás enfoques de la probabilidad. Nosotros diríamos que el concepto de probabilidad subjetiva es actualmente la única base que permite formular cálculos de probabilidad sobre una inteligente vida extraterrestre.

f_p, n_e

GOLD: Mi tarea consiste en discutir el sistema solar y la probabilidad de que existan otros sistemas de este tipo en la Galaxia. Nuestro interés se debe, claramente, a que este sistema solar es el único lugar en el cual sabemos que ha aparecido una vida con algún grado de inteligencia. Como es lógico, podemos estar muy equivocados al pensar que los sistemas solares constituyan lugares particularmente favorables para la vida, y tendríamos que investigar otras localizaciones no planetarias para dar con una vida inteligente. Pero creemos que nuestras razones acerca de una concentración sobre los planetas no son únicamente de naturaleza egocéntrica. Creemos saber que las circunstancias que se dan en los planetas son especialmente favorables para la evolución de algunos accesorios necesarios a la vida.

Pensamos que es necesaria una química complicada, y eso determina cierto intervalo de temperaturas que probablemente no debe exceder mucho a las temperaturas que tenemos en la Tierra. Pensamos también que las temperaturas no han de ser muy bajas; de lo contrario, las reacciones químicas tendrían lugar tan lentamente que la escala de tiempos disponible resultaría insuficiente para el desarrollo de cualquier sistema complejo.

Además de las condiciones de temperatura, está la condición de que exista un flujo no térmico de energía a través del sistema. Creemos que este flujo no térmico de energía convendría que fuese en forma de fotones, pero quizás este requisito no sea absolutamente necesario. Si adopta la forma de fotones, éstos no han de presentar una energía excesivamente elevada, porque en este caso destruirían la química compleja que tratamos de crear.

Vemos que estas circunstancias se dan en la Tierra; tene-

mos el intervalo de temperaturas que estamos discutiendo y disponemos además de fotones solares que permiten extraer energía y utilizarla en los sistemas biológicos.

Quisiéramos comprender nuestro sistema solar para poder responder a las siguientes preguntas: ¿Con cuánta frecuencia se da en el universo? ¿Alrededor de qué tipo de estrellas existen sistemas planetarios? ¿Cuál es la distribución de los tamaños de los planetas y sus distancias a las estrellas? ¿Qué temperaturas se dan en estos planetas? ¿Qué rotación presentan estos planetas? ¿De qué escala de tiempo disponen para su evolución?

Las discusiones anteriores sobre el sistema solar afirmaban que el acontecimiento que produjo nuestro sistema fue algo relativamente raro. En los últimos tiempos hemos desembocado en un conjunto de consideraciones, que voy a presentar, y que nos hacen pensar como probable que el origen del sistema solar se debiera a un acontecimiento corriente. Creemos ahora que en algún tiempo tuvo que existir una nebulosa solar que rodeaba al Sol; creemos que eso se produjo hace alrededor de unos 5 mil millones de años, y podemos discutir con cierto detalle el comportamiento dinámico que debió de presentar esa nebulosa.

El hecho de la distribución de los planetas en un plano tan estrecho implica que el origen del sistema fue un gas, porque sólo de ese modo podemos comprender el estrechamiento de una lámina de materia hasta ocupar un plano muy estrecho. Creemos luego que el momento angular del sistema tuvo que redistribuirse de tal modo que sólo un 0,2 por ciento aproximadamente de la masa del sistema acabara poseyendo el 98 por ciento del momento angular. Eso no pudo suceder con facilidad en un solo acontecimiento, y por lo tanto creemos que tuvo que existir un período a lo largo del cual se produjo esa gradual redistribución del momento angular. La segunda fase que tuvo que producirse es un proceso de condensación (sobre el cual volveré a hablar) y la tercera una pérdida de hidrógeno.

En cuanto a la condensación, comprendemos algunos aspectos de ella, pero no todos. Comprendemos que los materiales más refractarios se condensaron más cerca del Sol, y que los materiales cada vez menos refractarios se condensaron a distancias mayores; que los planetas terrestres se formaron con materiales del tipo de los silicatos y el hierro, y que luego los planetas gigantes –Júpiter y los siguientes, situados después de los planetas terrestres– parece ser que se formaron inicialmente con materiales como el carbono, el nitrógeno y el oxígeno

principalmente, y que más tarde adquirieron una gran cantidad de hidrógeno y de hielo.

Como ya se sabe, Júpiter y Saturno disponen de gran cantidad de hidrógeno y de helio, pero no sucede lo mismo con Urano y Neptuno. Probablemente están formados en gran parte de carbono, nitrógeno y oxígeno, y eso me lleva al siguiente punto: es necesario suponer que en una fase posterior de la formación del sistema solar se perdió una gran cantidad de hidrógeno.

Permitan que añada unas palabras sobre la condensación. Las partículas tuvieron que condensarse a partir del gas de acuerdo con sus presiones de vapor y quizá de acuerdo también con otras consideraciones, como los procesos de nucleación y los procesos de crecimiento de cristales. Algunos quieren convencernos de que también intervinieron los potenciales de ionización en la selección del proceso de condensación. En todo caso, primero se formaron pequeñas partículas y sus órbitas los obligaron luego a unirse mediante procesos que una vez iniciados parece que se desarrollaron muy rápidamente.

Es sorprendente que los planetas estén tan bien espaciados que no exista realmente peligro de colisión. Si empezamos a acumular partículas en el espacio, al azar, tendremos al final unos sistemas donde las colisiones serán bastante frecuentes. Es probable, por lo tanto, que hubiese un período de crecimiento de cuerpos y de colisiones, a partir del cual se seleccionó gradualmente un conjunto de cuerpos cuyas órbitas no estaban ya en colisión. Quizá tengamos los últimos restos de esta fase de colisiones en los numerosísimos cráteres que observamos en Marte y en la Luna.

En relación a los planetas exteriores, el proceso de condensación de las partículas heladas de carbono, nitrógeno y oxígeno tuvo que haber pasado también por esta fase de colisión, y la pista de que así fue puede encontrarse en este caso en los cometas. Posteriormente, cuando se hubo reunido suficiente carbono, nitrógeno y oxígeno para atraer al gas de hidrógeno, las condensaciones crecieron gracias a la acumulación gravitatoria del gas de hidrógeno y del helio.

Los que discuten el origen del sistema solar aceptan ampliamente estos puntos; pero como es lógico continúan en el aire muchos puntos debatibles que no he abordado. El mecanismo que permitió transferir el momento angular no está nada claro. Pensamos que intervinieron campos magnéticos. Los detalles referentes a los procesos de acumulación y a los mecanismos de condensación, el proceso de la pérdida de hidrógeno por

parte del exterior del sistema solar, donde tuvo que estar presente pero cuya ausencia es ahora clara: todos estos mecanismos se comprenden muy poco.

Sin embargo, he explicado todos estos puntos porque creo que pueden serles útiles a ustedes, especialmente a los no astrónomos, cuando consideren la posibilidad de que existan en otras partes sistemas semejantes. Estamos interesados en sistemas solares con escalas de tiempos tan largas como el nuestro, o del mismo orden, a fin de que se disponga de tiempo suficiente para la evolución de vida inteligente. Eso significa de entrada que no estamos interesados en los sistemas que puedan formarse alrededor de estrellas muy pesadas y brillantes, porque esas estrellas tienen una vida muy corta. Su posterior evolución haría imposible la continuación de la vida en sus planetas. Esta consideración nos limitaría a estrellas algo más brillantes, algo más pesadas que el Sol, para luego descender a estrellas mucho más frías y de masa mucho menor que el Sol.

Permítanme ahora presentar alguna información sobre otras estrellas significativas para los sistemas planetarios extrasolares. El punto más importante sobre estas estrellas es su momento angular. Es muy importante el hecho de que estrellas como el Sol presenten valores del momento angular peculiarmente bajos. Está muy claro que tuvieron que perder momento angular desde la época de su formación. Si tomamos una masa arbitraria igual a la masa del Sol en cualquier punto de la Galaxia y la reunimos, girará a mucha mayor velocidad que el Sol; girará a una velocidad muy cercana a la de ruptura. El hecho de que el conjunto muy numeroso de todas las estrellas cuya masa va desde un valor ligeramente inferior a un valor ligeramente superior al del Sol, el hecho de que se haya observado que todas estas estrellas presentan valores pequeños de su momento angular significa con seguridad que hubo un proceso de pérdida. La figura 1 presenta un cuadro de la situación estadística. Las estrellas de mucha masa están a la derecha, las de menor masa a la ızquierda. El Sol es una estrella G0. La mayoría de las estrellas tienen menos masa que el Sol. Observen que en las estrellas de más masa se da una tendencia hacia valores bastante elevados del momento angular, mientras que en las estrellas de menor masa desciende de repente a valores mucho más bajos. Si tuviéramos que aumentar el momento angular por unidad de masa del Sol añadiéndole su sistema planetario, el punto del Sol en la figura 1 vendría a caer casi en la misma curva que las estrellas de más masa.

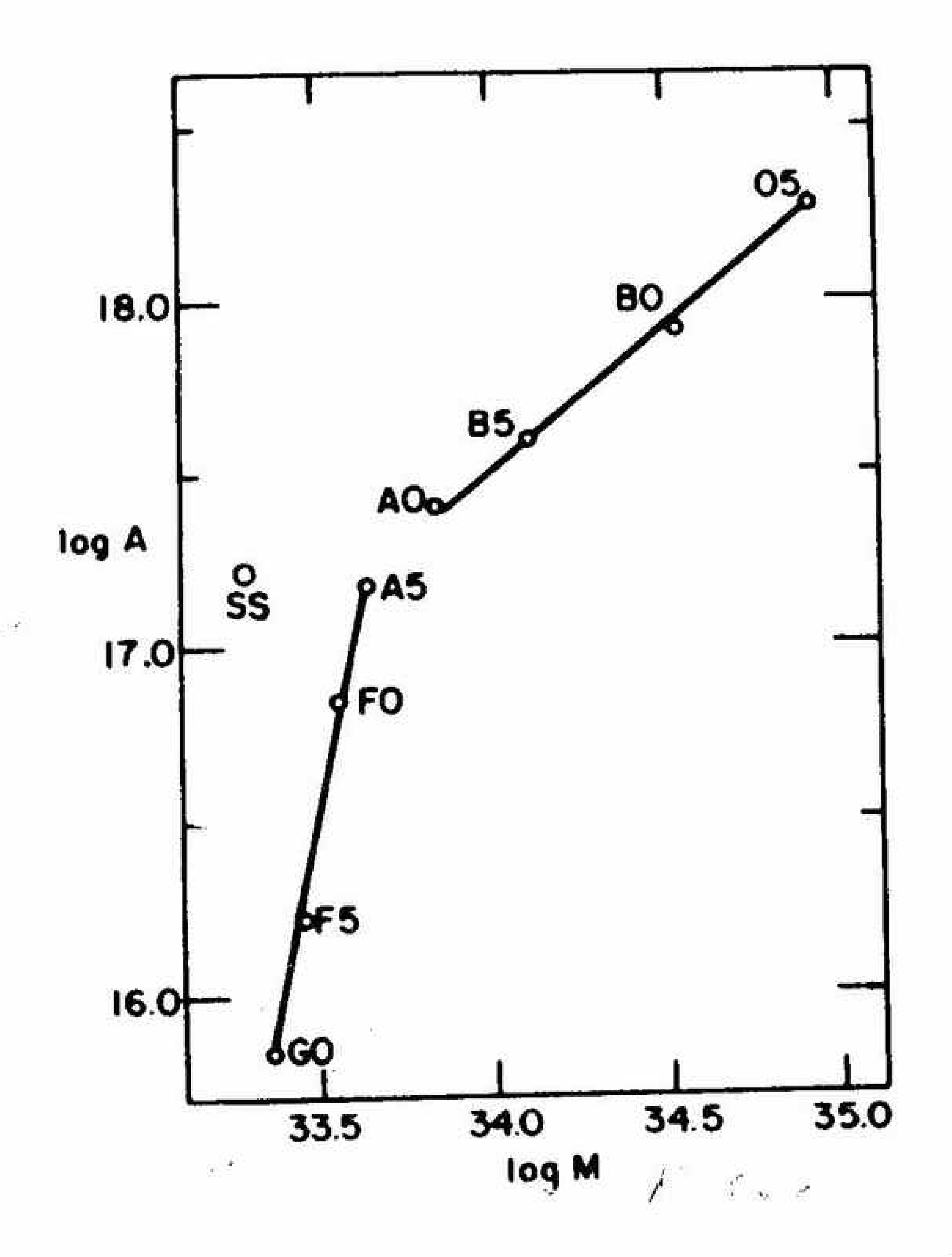


FIG. 1. El logaritmo del momento angular A de las estrellas en función del logaritmo de las masas M de las estrellas. La curva presenta un codo sorprendente en el inicio de los tipos espectrales A. Es posible que las estrellas situadas en el extremo izquierdo del diagrama hayan transferido su momento angular inicial a sistemas planetarios situados en torno suyo. El punto señalado con SS indica el lugar que ocuparía el Sol si el momento angular del sistema solar se incorporara al momento angular de rotación del Sol.

Ésta es la razón más convincente de que disponemos para suponer que la formación del sistema solar fue el medio mediante el cual tuvo lugar esa pérdida especial de momento angular. Digo que es el argumento más sólido de que disponemos. No les pido que lo acepten, pero vale la pena discutirlo. Puede suceder, desde luego, que el momento angular se pierda en un proceso que no siempre conduzca a la formación de un sistema solar, y eso es ciertamente probable: la cantidad de hidrógeno que parece haberse desprendido de la parte exterior del sistema solar debió contener mucho más momento angular que todo el resto del sistema solar junto. Si en nuestro caso podría haberse dado esta pérdida, uno podría muy bien pensar

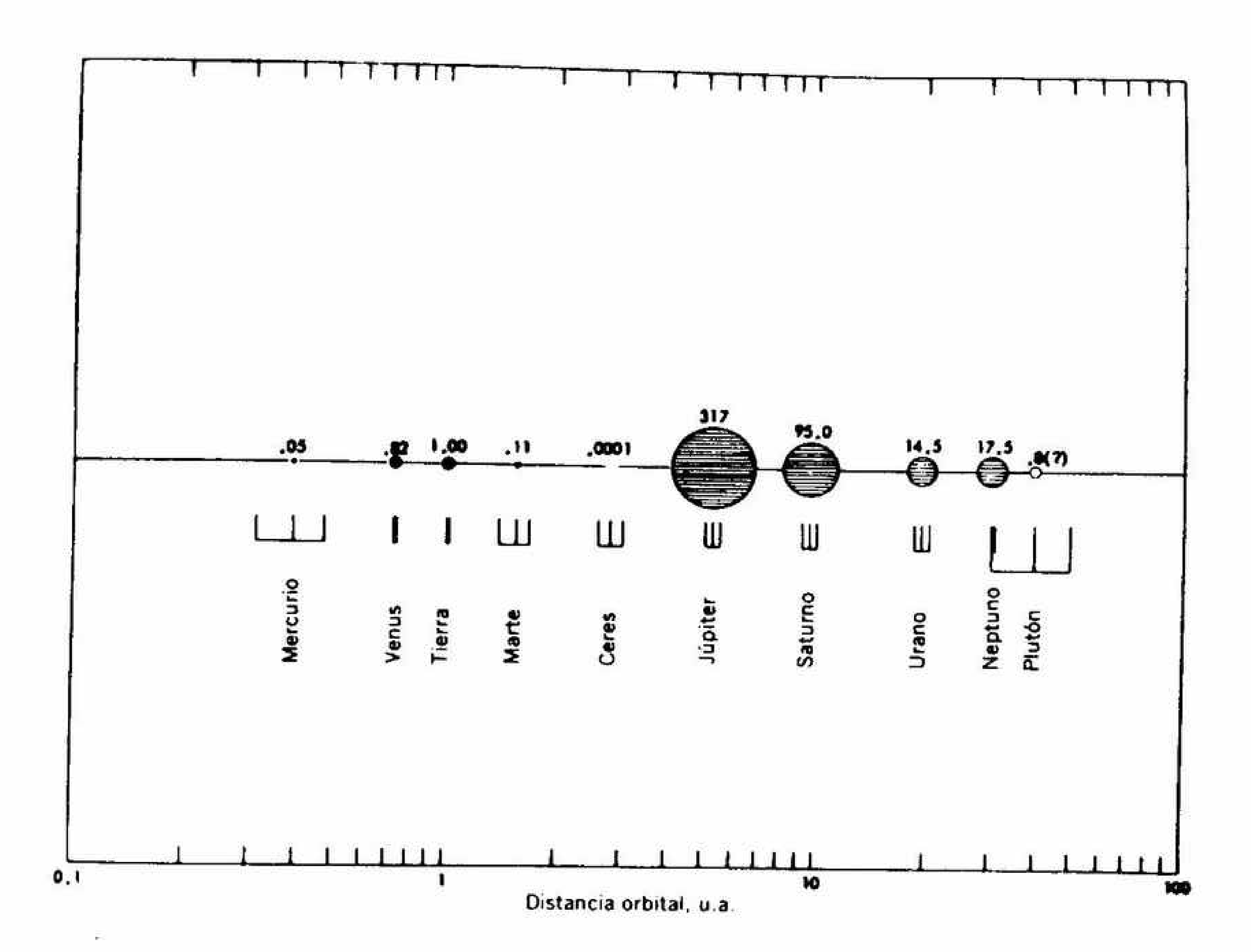


FIG. 2. Representación del sistema solar. Las distancias de los planetas al Sol están en unidades astronómicas (u.a.) La Tierra está a una unidad astronómica del Sol. Las masas de los planetas están indicadas en función de la masa de la Tierra, que se toma como unidad. (De S. Dole, *Icarus* 13, 1970, p. 504.)

que en otros casos no fue toda la cantidad de momento angular lo que se perdió de este modo. Puesto que no conocemos el proceso que tuvo lugar en este caso, no podemos decidir fácilmente si era un proceso probable o improbable.

Quiero discutir ahora brevemente la probabilidad de la formación de planetas aproximadamente como los nuestros, suponiendo que partimos de una nebulosa solar. Dole* ha calculado con una computadora el tipo de sistemas planetarios que se formarían mediante una acumulación al azar dentro de la nebulosa. Voy a presentar algunos ejemplos de los muchos cálculos que ha llevado a cabo, sólo para que vean que no es excesivamente improbable que procesos de este tipo desemboquen en sistemas como el nuestro.

La figura 2 muestra nuestro sistema solar actual. El tamaño del círculo indica la masa del planeta. El tridente inferior

* S. DOLE, «Computer simulation of the formation of planetary systems», *Icarus* 13, 1970, pp. 494-508.

indica la excentricidad de la órbita planetaria. La distancia al lado izquierdo de la figura es la distancia al Sol. Éste es nuestro sistema solar actual; voy a presentar ahora algunos ejemplos de acumulaciones nebulares al azar, y así podrán juzgar si nuestro sistema podía ser uno de tales ejemplos al azar.

Las excentricidades de la figura 3 son en conjunto algo mayores que las de nuestro sistema solar. Los planetas correrían un peligro algo mayor de colisión. Supongo que si se llevaran a cabo los cálculos para períodos bastante más largos de modo que se permitieran colisiones seguidas por un período de dispersión y reacumulación, la simulación computada probablemente se parecería todavía más a nuestro actual sistema solar.

La figura 4 presenta otro conjunto de cálculos. Como pueden ver, se obtiene más o menos una aproximación de la Ley de Bode, la así llamada distribución aproximada de los planetas a partir del Sol. Los planetas mayores tienden a situarse en

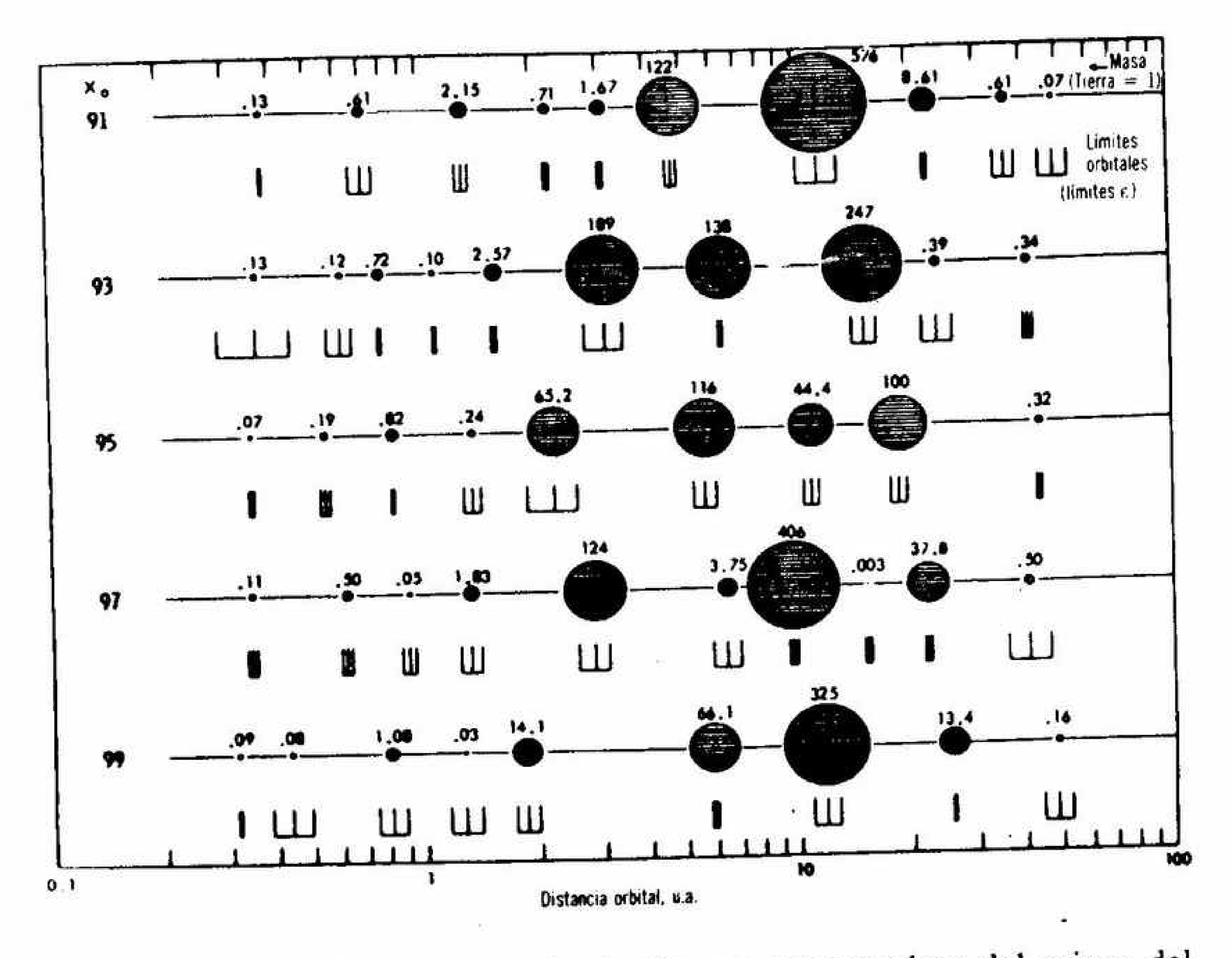


FIG. 3. Resultado final de una simulación por computadora del origen del sistema solar llevada a cabo por Dole. Las cifras de la izquierda indican números aleatorios que determinan la inyección de núcleos de condensación dentro de una nebulosa solar en condensación. (De S. Dole, *Icarus* 13, 1970, p. 500.)

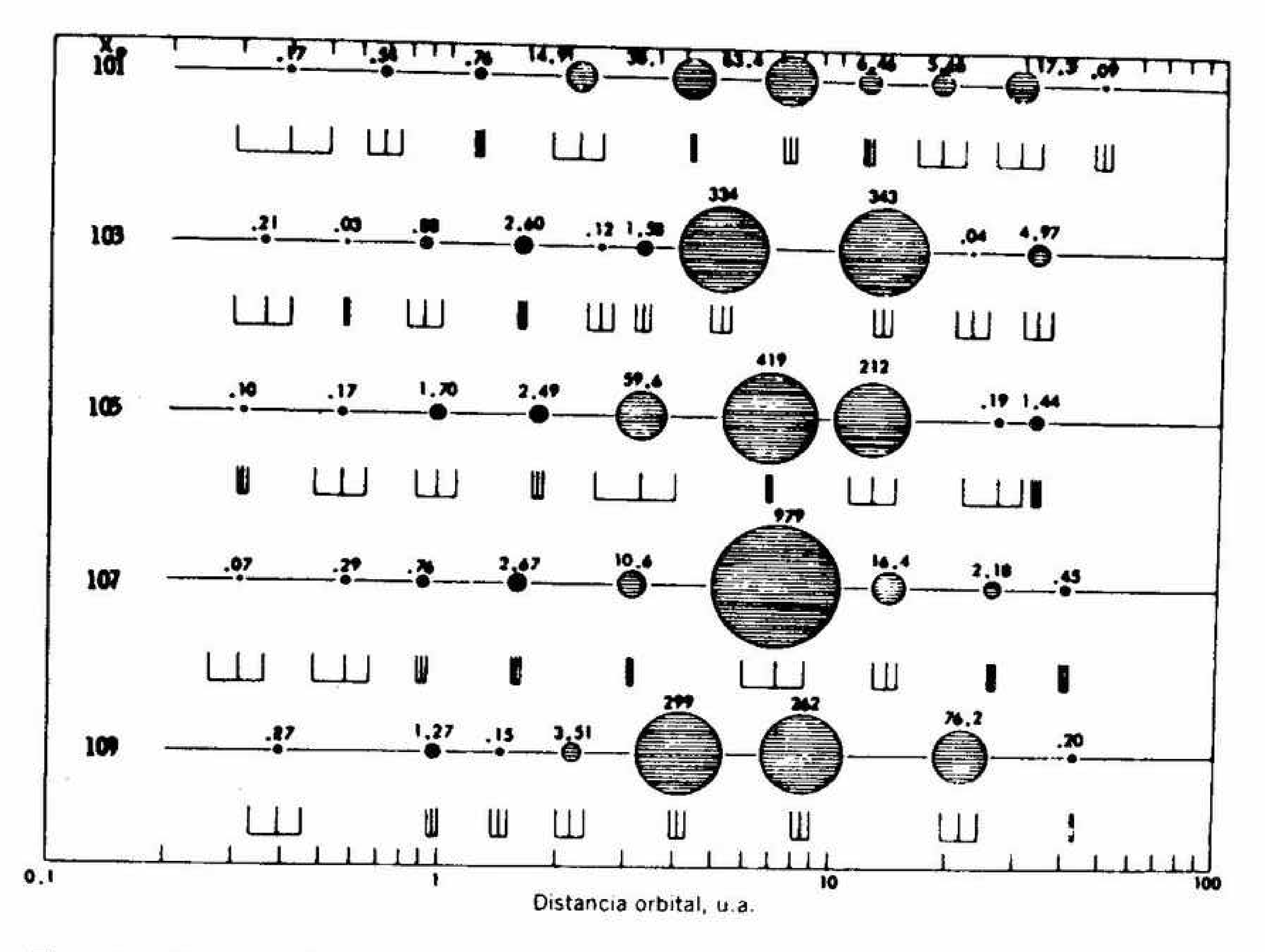


FIG. 4. Otro conjunto de sistemas solares simulados, según Dole. (S. Dole, *Icarus* 13, 1970, p. 501.)

los lugares correctos. Creo, por lo tanto, que el proceso de condensación no constituye ya realmente un gran misterio.

Permítanme subrayar, sin embargo, que existe todavía un elemento que no ha sido explicado en absoluto por cualquiera de estas discusiones. Se trata de la presencia de los aproximadamente treinta y un satélites naturales que tenemos en nuestro sistema solar. Los satélites precisan de alguna explicación especial. Las teorías sobre el origen de nuestra Luna son en su mayor parte especiales para ella, lo que no resulta muy satisfactorio cuando uno piensa que quedan treinta lunas más por explicar. Pero no me quedan dudas de que eso no cambiaría la discusión básica que les he planteado, y de que simplemente, en el transcurso del tiempo, así lo espero, descubriremos el proceso físico detallado que ha dado origen a la alta probabilidad de formación de sistemas de satélites.

Llego ahora a los hechos observados en la vecindad de otras estrellas que nos hacen suponer la posible presencia allí de sistemas planetarios. Somos conscientes de que no nos es posible observar directamente por medios ópticos o de radio la existencia de planetas. La única técnica de que disponemos

actualmente consiste en deducir la existencia de un compañero invisible alrededor de una estrella cuyo movimiento se haya observado con mucho cuidado. Esta técnica es muy difícil y sólo puede aplicarse a las estrellas muy próximas. De este modo sólo puede observarse una muestra muy pequeña de estrellas, e incluso así tiene que ser un objeto invisible de bastante masa para que explique las variaciones muy pequeñas observadas en la posición de la estrella. Por lo que sabemos, la mayoría de estos casos suponen un compañero cuya masa supera en mucho a la masa de nuestros planetas, y por lo tanto es muy probable que no se refiera a una situación semejante a la de nuestro sistema planetario. Sólo hay una estrella conocida, la de Barnard, donde la masa que desvía la posición de la estrella sea comparable a la masa de nuestro sistema solar. El profesor Van de Kamp la ha investigado muy a fondo y ofrece un diagrama (figura 5) de las desviaciones de la posición de la

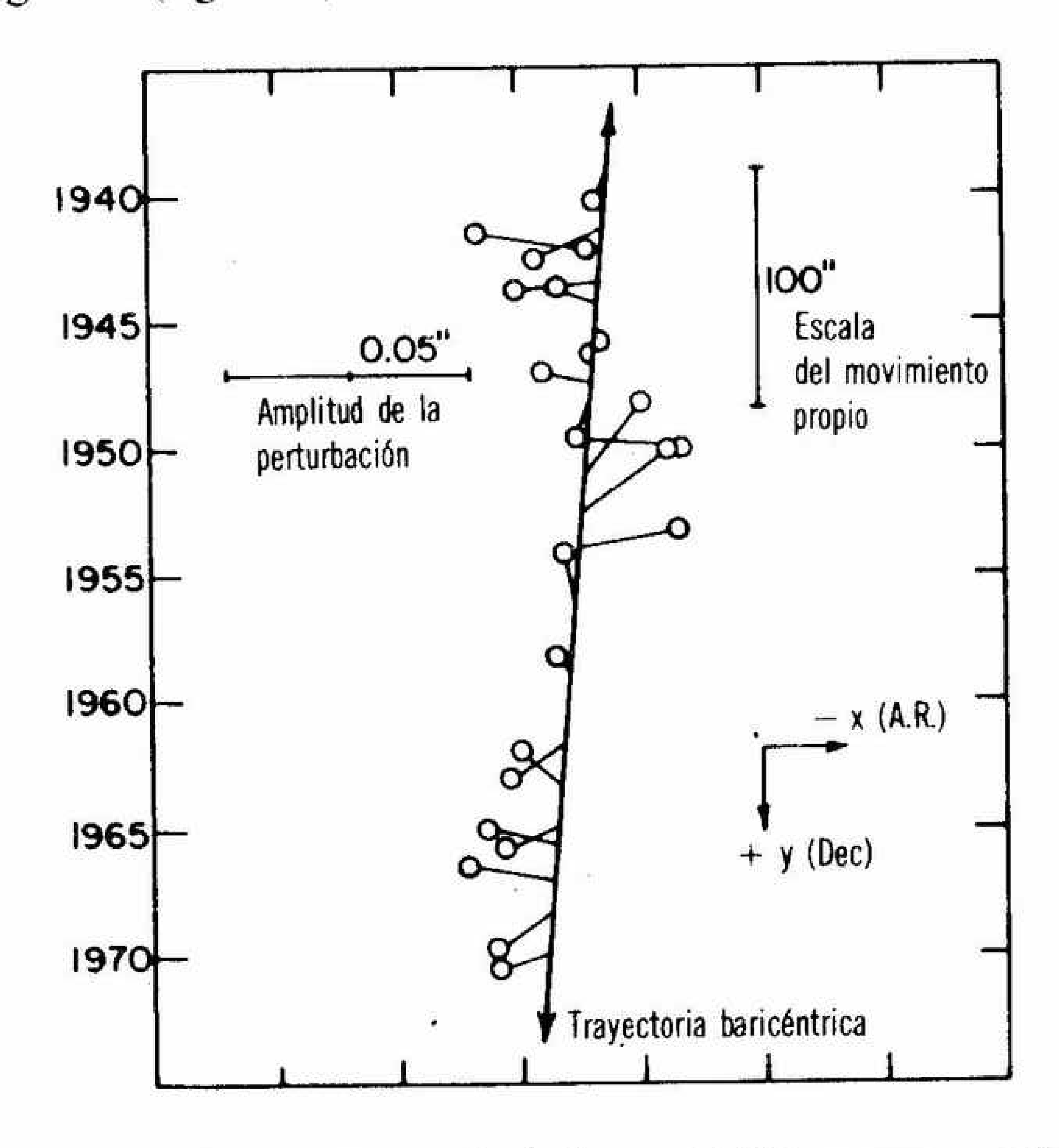


FIG. 5. Perturbaciones de la estrella de Barnard debidas a uno o a más compañeros oscuros, a lo largo de tres décadas de mediciones. La línea negra presenta el movimiento medio de la estrella de Barnard con respecto al fondo de estrellas más distantes. Los círculos unidos a esta línea muestran las perturbaciones con respecto al movimiento medio debidas al o a los compañeros oscuros. Según Peter van de Kamp.

estrella con relación al camino medio que habría seguido si no hubiese existido el compañero. Fíjense en la pequeñez de la desviación en juego. Se ha observado mediante 3 000 placas fotográficas sobre las cuales midió con mucho cuidado la posición de la estrella. Esto lo interpreta luego en función o bien de un compañero más bien excéntrico de una masa algo mayor que la de Júpiter, o bien en función de dos órbitas más circulares de dos planetas cuyas masas serían muy semejantes a las masas de Júpiter y Saturno. Pero la estrella de Barnard tiene de por sí una masa mucho menor que la del Sol, aproximadamente un 15 por ciento de la masa del Sol, y por lo tanto estas órbitas están mucho más juntas, aunque sus períodos sean aproximadamente semejantes a los de las órbitas de Júpiter y Saturno.

Creo que se pueden dar muchas más interpretaciones posibles para el tipo de compañeros que satisfarían estos datos, y ustedes no tienen que tomar demasiado en serio la interpretación de Júpiter y Saturno. Deben recordar, como es lógico, que la presencia de cuerpos como Júpiter y Saturno en la vecindad de una estrella no nos daría una pista muy buena sobre la posible existencia de cuerpos como la Tierra. Sin embargo, caso de iniciarse un proceso de concentración, es muy probable que allí se diera la misma situación que aquí, es decir que los materiales refractarios se condensarían cerca de la estrella, y los materiales más ligeros a mayor distancia. Por lo tanto, si existen de hecho cuerpos grandes como Júpiter y Saturno alrededor de la estrella de Barnard más cercanos a ella que los planetas equivalentes de nuestro sistema, es posible o probable que los silicatos y el hierro se hayan condensado todavía más cerca de la estrella.

Por lo tanto, para nuestra presente discusión, conviene darse cuenta de que las circunstancias que originaron la condensación de silicatos y de hierro son precisamente las mismas que más tarde conducirían a un régimen de temperatura biológicamente razonable. Esto sugiere que si discutimos un sistema solar en la vecindad de una estrella mucho más fría, planetas como la Tierra estarían situados convenientemente más cerca de la estrella. Quizá no sea exactamente así, pero va en el sentido adecuado.

Un punto final se refiere a la rotación de los planetas. Los planetas interiores del sistema solar se ven afectados muy seriamente por mareas solares y han adoptado estados de rotación que están muy dominados por este efecto. Si nos interesáramos por sistemas planetarios mucho más próximos a

una estrella más pequeña, ciertamente tendría que preocuparnos el hecho de que sus rotaciones se viesen mucho más dominadas por estas mareas.

Se pensaba antes que el Sol dominaría en el sentido de obligar a los planetas cercanos a girar de modo que el mismo hemisferio esté vuelto continuamente hacia el Sol. A consecuencia de esto el planeta sería muy caliente en un lado y muy frío en el otro: un planeta bastante hostil a la biología. Afortunadamente en el caso de nuestros planetas cercanos, Mercurio y Venus, hemos descubierto que no es así. Mercurio quedó atrapado cuando su rotación iba disminuyendo a consecuencia de las mareas, pero quedó atrapado en una resonancia particular: da una vuelta y media por órbita, y actualmente comprendemos que se trata realmente de una situación muy probable en cualquier planeta cercano.

Este tipo de resonancia impide una relajación al modo de rotación sincrónico. Existen muchas resonancias más, aparte de la de Mercurio, que hubieran servido de igual manera para detener su modo de rotación.

La situación de Venus es todavía más complicada, pero no presenta tampoco una rotación sincrónica con el Sol. Por lo tanto, creo que de momento no tenemos que preocuparnos de que un sistema planetario mucho más pequeño que el nuestro, un sistema con los planetas mucho más próximos a una estrella más pequeña, esté en su totalidad en rotación sincrónica.

Ésta es nuestra situación actual. Todos ustedes pueden juzgar con igual libertad a partir de esta información la probabilidad de que sea normal la presencia de sistemas solares alrededor de otras estrellas.

OLIVER: Dispongo de información adicional que quizá les interese sobre la posible arquitectura planetaria de la estrella de Barnard. El análisis original de Van de Kamp, publicado en 1963, suponía un compañero planetario; la solución indicaba una excentricidad de 0,65 para este cuerpo único. Una publicación posterior de Van de Kamp en 1969 suponía dos cuerpos con excentricidad nula. Ambas soluciones daban aproximadamente los mismos restos de error.

Una solución más reciente, no publicada todavía pero presentada para su publicación en *Icarus*, elaborada por Suffolk y Black* supone tres planetas y da unos residuos sustancialmen-

* Este artículo se ha publicado con posterioridad: D. C. BLACK y G. C. J. SUFFOLK, «Concerning the Planetary System of Barnard's Star», *Icarus* 19, 1973, pp. 353-373.

te más pequeños que los de las dos soluciones anteriores. Los tres planetas parecen presentar razones de distancias que valen 1,55 para los dos primeros y 1,61 para los dos segundos. Ambos valores son semejantes a la Ley de Bode del sistema solar. El planeta más interior de este sistema está a una distancia de la estrella de 1,8 unidades astronómicas; el más exterior está a 4,5. Esto parece indicar en cierto modo que la escala del sistema planetario se corresponde con las dimensiones de la misma estrella. Las masas son de 1,26 masas de Júpiter para el primero, 0,63 para el segundo y 0,89 para el tercero.

MOROZ: ¿Qué opina el profesor Gold sobre el origen de la Luna?

GOLD: Creo que todos los satélites tuvieron su origen en forma de nubes de pequeñas partículas que se acumularon gradualmente dando unos pocos satélites. El movimiento de pequeñas partículas en el sistema solar está influido por la resistencia del gas y por el efecto Poynting-Robertson, el efecto dinámico de la luz solar; puede imaginarse que las partículas pequeñas, en lugar de cruzar la órbita de un planeta y moverse hacia el interior, hacia el Sol (como se pensaba generalmente), se acumularían en parte alrededor de los planetas y formarían luego cuerpos únicos. No es posible concebir la formación de los satélites del mismo modo que la formación de los planetas alrededor del Sol, porque no es posible imaginar que los planetas contuviesen capas de gas alrededor suficientemente densas para dar satélites al acumularse. El gas no sobreviviría. No podemos imaginar que el sistema de satélites de Júpiter se formó del mismo modo que se formó el sistema planetario alrededor del Sol.

TER-MIKAELIAN: Los cálculos que nos dio son muy interesantes. ¿Tuvo en cuenta en sus cálculos la pérdida de hidrógeno? ¿Puede proponer alguna explicación para la pérdida de hidrógeno?

GOLD: Sabemos que tuvo que haber hidrógeno si la composición del material solar fue la responsable de la formación de los planetas. Los actuales Urano y Neptuno están formados de algo que es mucho más rico en carbono, oxígeno y nitrógeno que en hidrógeno y helio. Por lo tanto, el hidrógeno y el helio tuvieron que perderse de esta región del sistema solar. La cantidad perdida puede deducirse de la cantidad de carbono, nitrógeno y oxígeno presente en la composición solar, y esta cantidad es muy grande.

El Sol actual no estaría en condiciones de proporcionar energía suficiente a aquella distancia para evaporar todo este hidrógeno del sistema solar. Por lo tanto, tenemos el problema de saber de dónde vino la energía que se llevó todo este hidrógeno. Podría ser, o bien que el Sol en una época anterior tuvo un brillo superior y suficiente, o bien que la hidrodinámica de la Galaxia barrió el gas de la parte exterior del sistema solar.

CRICK: La cuestión es si lo tuvo en cuenta en sus cálculos.

GOLD: Los cálculos de Dole no incluyeron correctamente la pérdida de hidrógeno sino que únicamente limitaron la cantidad total de gas disponible.

GINDILIS: ¿Las estrellas de tipos espectrales más tempranos dispondrían de escalas temporales adecuadas para la evolución de sus planetas?

GOLD: En mi opinión deberíamos discutir en primer lugar escalas temporales comparables a las de la Tierra. No hay duda de que es totalmente razonable discutir escalas temporales más cortas y confiar en que quizá en otras circunstancias la vida pueda evolucionar mucho más de prisa. Por otra parte el número total de estrellas con mucha masa es muy pequeño, por lo que si uno considera las estrellas de más masa y una escala temporal más corta, habría que tener en cuenta una clase de posibles habitáculos de la vida mucho más pequeña que la obtenida yendo en la otra dirección y discutiendo estrellas de menor masa, que son más abundantes, mucho más, y cuyas escalas temporales son muy largas.

MARX: ¿Podría comentar un poco la rotación de Venus?

GOLD: La rotación de Venus constituye un fenómeno notabilísimo. No hablé de ella con detalle, porque al ser tan notable, creo que no tiene una validez muy general en la discusión de otros sistemas planetarios, y la rotación de Mercurio no es de este tipo. La rotación de Mercurio es de un tipo que imagino muy corriente en otros sistemas planetarios.

Parece ser que Venus inició su vida con un giro retrógrado; luego se vio frenado por una fricción de mareas muy intensa,

para ser luego capturado en resonancia con la Tierra. El pequeño campo de marea creado por la Tierra en la posición de Venus parece que fue suficiente para trabar a Venus de tal modo que en las sucesivas máximas aproximaciones a la Tierra se encare con ella del mismo modo cada vez. Desde luego hay muchos modos posibles. Lo cierto es que quedó capturado en el quinto de estos modos; actualmente está tan próximo a esta situación precisa, con aproximación superior a una parte entre 2 000 de la velocidad de rotación, que debemos suponer que la captura tuvo lugar realmente así.

Hemos discutido con cierto detalle el hecho de que un efecto tan pequeño como el campo gravitatorio de la Tierra pueda ser importante. De momento parece que sólo puede tener importancia si el efecto de marea solar es casi nulo debido a las influencias opuestas de la marea del cuerpo sólido y de la marea atmosférica. Sabemos que en la Tierra el efecto de la marea solar atmosférica tiende a acelerar la rotación terrestre con energía proporcionada por el calentamiento solar en fase con el efecto gravitatorio. Este efecto se opone al tipo de fricción de la Tierra sólida que, como es lógico, tiende a frenar el giro. En el caso de la Tierra, la marea atmosférica es inferior en un factor 2 a la marea del cuerpo sólido. En el caso de Venus es muy posible que las dos mareas sean comparables y de sentidos opuestos; de ser así, podríamos comprender que el pequeño efecto adicional de la marea de la Tierra en resonancias completas dominase y capturase a Venus para este giro. Parece que así fue. Es un caso muy complicado y muy especial.

GINZBURG: ¿Cuál es el período de rotación?

GOLD: Doscientos cuarenta y tres días terrestres.

AMBARTSUMIAN: Puesto que el profesor Gold ha discutido solamente los esquemas teóricamente posibles de desarrollo de nuestro Sol y de estrellas enanas de tipo solar, quizá convenga discutir brevemente los resultados obtenidos en el curso de investigaciones realizadas en las últimas décadas y basadas en un conjunto muy grande de datos observados.

Los esquemas teóricos pueden ser elegantes o consistentes, pero si no se basan en un conjunto de datos reales, no podrá considerarse que tengan relación con la realidad; en cambio, los descubrimientos observacionales siempre se relacionan con estrellas reales. Me refiero a la fase real de desarrollo de

estrellas en la parte inferior de la serie principal, es decir, estrellas cuya masa es del orden de la del Sol.

Es evidente que las fases primeras del desarrollo de esas estrellas, la fase llamada T Tauri, siguen directamente a la formación de una estrella. Esta fase primera se caracteriza por una gran inestabilidad, por la falta de un estado constante, y por un cambio pronunciado en la luminosidad de la estrella tanto en el intervalo de las longitudes de onda ópticas como ultravioletas. Durante esta fase aparece alrededor de la estrella una nube o cáscara de gas a veces bastante densa, e incluso opaca, que más tarde se dispersa. Probablemente se da en esta fase una eyección intensa de partículas, hidrógeno, etc.

Esta fase, que probablemente resultaría muy inconfortable para la vida, va seguida por la fase de estrella eruptiva. Parece ser que la mayoría de las estrellas, si no todas, pasan por esta fase eruptiva. En todo caso no tenemos pruebas en contrario, pero tenemos pruebas de que la mayoría de las estrellas pasan por esta fase. Al principio las erupciones recurrentes son muy pronunciadas. Luego disminuyen gradualmente hasta desembocar en el tipo de erupciones que observamos en el caso de nuestro Sol. Diré para los no astrónomos que estas erupciones duran de media hora a una hora; la parte ascendente, la crecida, es muy rápida, de un minuto o dos, y luego se produce una disminución gradual de la luminosidad de la estrella. Sin embargo, la energía de las erupciones es muy grande, y a veces el aumento es cien veces o más superior a la luminosidad inicial de la estrella.

La energía de las erupciones es muy grande. Es del orden de 10^{36} o 10^{37} ergios. Las erupciones van declinando gradualmente a lo largo de la vida de la estrella, es decir, en un período de muchos millones o miles de millones de años.

Aunque el conjunto de pruebas sea hasta ahora insuficiente, parece posible decir de qué modo la energía depende de la masa y de la edad de la estrella. Voy a escribir ahora una fórmula, pero me gustaría subrayar que se trata de una aproximación muy basta y que para conseguir una relación más precisa habrá que acumular más pruebas:

$$E_{max} = CT\mathfrak{M}^{-K}. \qquad (2)$$

Aquí E_{max} es la energía de la erupción, y me refiero ahora a la energía máxima, porque además de erupciones máximas pueden darse erupciones menos enérgicas de la misma estrella durante su desarrollo; $\mathfrak{M}$ es la masa de la estrella, y T es su

edad; el exponente K está más o menos en la proximidad de 1, pero con mayor probabilidad entre 1 y 1,5; C es una constante de proporcionalidad.

Esta fórmula quizá no sea válida para todo el intervalo de vidas posibles de la estrella, pero es válida para un intervalo comprendido entre un millón de años y varios centenares de millones. Repito que la intensidad de las erupciones declina muy gradualmente, pero algunas estrellas, como las Híades por ejemplo, tienen todavía una actividad de este tipo muy intensa.

Si consideramos sistemas planetarios alrededor de tales estrellas, tenemos que tener en cuenta, naturalmente, estas erupciones. Corresponde a los biólogos decidir si estas erupciones tienen un efecto completamente letal, que eliminaría toda vida, o si por el contrario estas erupciones pueden presentar un efecto estimulante provocando reacciones que podrían dar origen a la vida.

La ecuación (2) es válida para la porción de onda corta del espectro, el azul, el violeta, el ultravioleta. No podemos ofrecer una descripción adecuada del otro extremo del espectro, pero suponemos que tales erupciones, como en el caso de nuestro Sol, van también acompañadas por la emisión de partículas de alta energía, y esto también hay que tenerlo en cuenta. Si ustedes piensan que en el caso de estrellas jóvenes hay un factor grande de incremento, un factor de varios miles, podrán sacar conclusiones sobre la intensidad del fenómeno en ese caso.

Quiero, pues, subrayar que el desarrollo de estrellas jóvenes está marcado por tales erupciones y que la intensidad de esas erupciones disminuye gradualmente.

Quiero decir también que artículos recientes del astrónomo inglés Royal Wooley y de otros indican que alrededor de nosotros hay un número muy grande de estrellas enanas jóvenes de ese tipo. La proporción es de una tercera o una cuarta parte. Una cuarta parte de las enanas que nos rodean tiene unos 10^8 años de edad, es decir, son muy jóvenes. ¿Cómo podemos reconciliar esto? Después de todo, la edad de la Galaxia suma miles de millones de años. Por lo tanto, nos vemos obligados a deducir que la formación estelar no fue un proceso uniforme y que en los últimos años, durante los últimos 100 a 200 millones de años, el proceso fue especialmente pronunciado. Creo que esto es muy interesante porque posiblemente hubo también otros períodos de intensa formación estelar.

No quisiera iniciar aquí una controversia sobre los orígenes de la formación de los planetas, pero me gustaría indicar que no me siento particularmente inclinado a favorecer la teoría de condensación que han mencionado aquí el profesor Gold y otros. Me gustaría recordar que en mi opinión existen también explicaciones alternativas de este fenómeno. Me gustaría que en nuestros puntos de vista sobre los orígenes de la formación de los planetas se reflejaran todos los descubrimientos de las observaciones astrofísicas.

MORRISON: ¿No es posible que la energía de las erupciones varíe con un exponente de la masa estelar bastante más elevado que la luminosidad y que por lo tanto la intensidad relativa de las erupciones aumente a medida que uno pasa a estrellas cada vez menos luminosas?

AMBARTSUMIAN: Supongo que la amplitud relativa crece, pero eso no significa que las estrellas con menos masa tengan erupciones mayores.

MORRISON: Pero creo que esto significa que su entorno próximo es menos estable para la confección de estas bonitas substancias químicas que dan origen a la vida. Pero no sé si esto es bueno o malo.

GOLD: Me siento muy satisfecho de que el profesor Ambartsumian nos haya ofrecido la parte astronómica de la discusión, que de hecho debería haber precedido mi discusión sobre la condensación de los planetas. Creo que debería integrar algo esta discusión dentro de la mía mediante unas cuantas observaciones.

En primer lugar, y como es lógico, no vamos a suponer que en la fase T Tauri, en la fase muy violenta de la nueva estrella, pueda haber una situación adecuada para la formación de planetas. Supongo también que la situación de erupciones muy violentas constituiría un trastorno para el origen de la vida, debido a las radiaciones muy duras que contiene; pero recuerden que he mencionado el problema de cómo llegó a existir una nube de gas alrededor de la estrella antes de adquirir el momento angular que la alejó lo bastante de la estrella para llegar a formar los planetas mayores. Todos pensamos que este proceso está relacionado con la fase T Tauri.

Nos gustaría luego comprender a partir de la discusión astronómica si sólo en el caso de estrellas por debajo de cierta

masa se genera una nube adecuada que pueda luego ser transportada hacia el exterior a la gran distancia del sistema solar. Confío que las investigaciones astronómicas, como las que ha citado el profesor Ambartsumian, nos darán en el curso del tiempo una indicación sobre la situación del punto de ruptura y sobre si realmente está situado en el mismo lugar que el punto de ruptura de las velocidades estelares que he descrito.

Ustedes recuerdan el gráfico (figura 1) de la masa en función del momento angular. Nos gustaría mucho saber si este punto de ruptura cerca del tipo espectral A5 coincide con una diferencia de conducta en la fase T Tauri.

El último punto formulado por el profesor Ambartsumian indica que no está en favor de la teoría de condensación de los planetas. Quisiera solamente decir que lo único que he intentado indicar es que estamos bastante seguros de que los planetas terrestres se formaron a partir de partículas sólidas y que los gigantes se formaron a partir de hielos que luego acumularon gases sobre sí. No sé que existan discusiones alternativas por el momento, pero si el profesor Ambartsumian puede ofrecernos algo, le escucharía con gusto.

AMBARTSUMIAN: La fase eruptiva dura como unas cien veces más que la fase T Tauri. Observamos y por ahora sólo podemos observar erupciones en estrellas de baja luminosidad, por razones explicadas por el profesor Morrison: porque la luminosidad normal aumenta en proporción a una potencia bastante alta de la masa. Por este motivo no podemos observar erupciones en estrellas del tipo F o G, aunque fuesen más brillantes que las de estrellas de tipo espectral K.

GOLD: Ya sé que no puede observar las erupciones, pero así y todo se podría reconocer la extensión de la fase T Tauri.

AMBARTSUMIAN: Los fenómenos T Tauri no se observan en el caso de estrellas de luminosidad elevada.

GOLD: ¿Se detiene la no observación en esta masa?

AMBARTSUMIAN: Alrededor del tipo espectral F.

GOLD: Es bastante próximo.

AMBARTSUMIAN: Como he dicho, no quiero iniciar una controversia sobre la cuestión de los orígenes de los sistemas

planetarios. He indicado únicamente que me siento ligeramente escéptico sobre la teoría de condensación.

El conjunto de pruebas acumulado en años recientes parece indicar que las explosiones y otros fenómenos que observamos en los núcleos de galaxias pueden estar relacionados con los orígenes planetarios, y de hecho eso puede constituir un fenómeno más frecuente en la naturaleza.

HUBEL: Probablemente todos los astrónomos conocen las alternativas a la condensación, pero yo, que no soy astrónomo, no tengo ninguna idea sobre el posible contenido de la lista. Me gustaría oír una posible lista de alternativas a la condensación.

AMBARTSUMIAN: La desintegración de cuerpos superdensos. Podría darse la condición de que comenzáramos a partir de la formación del núcleo de la galaxia para pasar luego a la formación estelar y planetaria, teniendo lugar un proceso en el sentido opuesto. A eso me refería. Hay varios artículos sobre el tema. No tengo ninguna teoría real sobre la formación planetaria, pero hay varias teorías que podríamos tomar en consideración.

MORRISON: Muy probablemente esto indica que incluso en las porciones bien determinadas de la ecuación (1) quedan todavía muchas cosas por aprender. Confío también que algunas personas empezaran a comprender que sólo me sienta cómodo en una estrella dG.

El profesor Ambartsumian se refirió también de paso a un punto que parecía privilegiar los últimos varios centenares de millones de años en nuestra vecindad estelar, lo cual vuelve a sugerirme que hay fenómenos que perturban las estrellas y que están relacionados con la rotación galáctica, probablemente con la rotación del brazo de la espiral; es muy bueno que vivamos en una pequeña y agradable estrella G en el disco. Por lo que sabemos, nos encontramos sólo accidentalmente en un brazo espiral.

MARX: La vida empezó en la Tierra hace unos cuatro mil millones de años. ¿Puedo preguntar qué aspecto tenía el Sol hace cuatro mil millones de años?

MORRISON: ¿Está preparado alguno de nuestros colegas astrónomos para describirnos el primitivo Sol y su grado de eruptibilidad?

DYSON: No soy un experto, pero el brillo era un 80 por ciento más o menos del brillo actual, y por lo que sé, la actividad eruptiva no tuvo que ser excesivamente superior a la actual.

SAGAN: Los modelos más recientes de la evolución del Sol muestran un aumento en luminosidad de un 30 a un 40 por ciento desde hace $4,5 \times 10^9$ años hasta el momento actual. Si tenemos que dar fe a estos modelos evolutivos y suponemos que el albedo terrestre, la emisividad infrarroja de la superficie y la composición atmosférica fueron constantes con el tiempo, la evolución solar implica que la temperatura global de la Tierra era inferior al punto de congelación del agua del mar hace unos dos mil millones de años.

Hay toda una serie de caminos para evitar esta contradicción evidente, contradicción porque hay excelentes pruebas paleontológicas y geológicas de la existencia de extensas cantidades de agua líquida hasta cuatro mil millones de años antes. Los cambios en el albedo surten efectos contrarios; a menor temperatura, un albedo más alto; y uno dispone de muy poco espacio para manejar la composición de la atmósfera terrestre. El CO_2 tiene un tope estricto; y a temperaturas inferiores habría menos vapor de agua, no más.

La solución exige algún componente atmosférico que, presente en pequeñas cantidades, pueda llenar la gran ventana infrarroja de los 8 a los 13 micrones en el máximo de Wien de la emisión Planck de la Tierra.

Hay un gas que en pequeñas cantidades cumple esta absorción: el amoniaco. Un 10^{-5} aproximadamente de amoniaco en la atmósfera primitiva soluciona muy bien este problema.

Lo interesante del tema son las siguientes consecuencias que se deducen de ello: en primer lugar, constituye una prueba en favor de unas condiciones reductoras en la primitiva historia de la Tierra, que son muy adecuadas para el origen de la vida; en segundo lugar, significa que la temperatura de la Tierra estaba aproximadamente alrededor del punto de congelación del agua en el momento de aparecer la vida, lo cual es muy útil para la preservación de las substancias orgánicas sintetizadas; en tercer lugar, significa que el oxígeno no estuvo presente en grandes cantidades en la atmósfera de la Tierra como más hasta hace mil o dos mil millones de años. Esto constituye un ejemplo de la estrecha relación que puede existir entre los acontecimientos de la evolución astronómica y los

acontecimientos de la evolución biológica.* Propongo que se planteen otras correlaciones de este tipo en nuestro tema.

MAROV: Me gustaría añadir unas pocas palabras a lo dicho por el profesor Sagan. La suposición de que hace cuatro mil millones de años el Sol tuvo aproximadamente una densidad de energía un 30 por ciento menos que ahora se deduce también de varios cálculos sobre la atmósfera de Venus. Según estos cálculos para la transferencia radiactiva de radiación solar con diferentes mezclas de gases en una atmósfera compuesta predominantemente por CO_2 en Venus, el incremento de luminosidad solar a lo largo del tiempo geológico fue suficiente para que un Venus bastante parecido a la Tierra pasara a presentar las condiciones existentes en aquel planeta a través de un efecto acelerado de invernadero.

MOROZ: Me gustaría hablar brevemente sobre la posibilidad o imposibilidad de observar planetas en otros sistemas solares. ¿Qué equipo precisamos para detectar la emisión de un planeta sobre el fondo estelar? La importancia de este problema es obvia. Los astrónomos son conscientes de la situación que se ha planteado, y es paradójico pero sabemos más actualmente sobre el origen de las estrellas que sobre el origen de nuestro sistema solar. Podemos observar las estrellas en diferentes fases de su evolución, mientras que el sistema planetario, el sistema solar, se nos presenta únicamente en un momento determinado. Por este motivo, todo lo que ha dicho hoy el profesor Gold podría haberlo dicho hace diez años. La cosmogonía planetaria está en un compás de espera.

Por lo tanto, lo que necesitamos es observar planetas en diferentes sistemas planetarios. Esto constituye un problema fantásticamente difícil; sin embargo me aventuraré a ofrecer algunas observaciones pertinentes. Quizá sean posibles otras soluciones técnicas, pero sólo discutiré una.

Supongamos que disponemos de un interferómetro como el que utilizó Michelson en sus mediciones, un interferómetro estelar. ¿Qué dimensiones debería tener este interferómetro y cuáles serían las longitudes de onda para este trabajo?

Podemos visualizar este trabajo de la siguiente manera. Consideremos una estrella como una fuente muy brillante, con planetas moviéndose alrededor. La estamos observando me-

* Se ha publicado un tratamiento posterior de este problema: C. SAGAN y G. MULLEN, «Earth and Mars: Evolution of Atmospheres and Surface Temperatures», *Science* 177, 1972, pp. 52-56.

diante un interferómetro estelar. Hay dos espejos y un sistema para dirigir la emisión hacia un telescopio. Si observamos con mucha precisión la dirección hacia la estrella –un problema muy difícil– el flujo de la estrella se mantendrá estable. El planeta, en su movimiento, cortará los lóbulos del interferómetro. Tendremos una fluctuación muy ligera del interferograma sobre el fondo de una emisión muy intensa procedente de la estrella.

¿Cuáles son, pues, las características que ha de presentar ese aparato? Supongamos que la estrella tiene exactamente las características de nuestro Sol y los planetas las de nuestra Tierra. En ese caso, la razón del flujo del planeta al flujo de la estrella sería 10^{-9}. Esta diferencia es muy importante. Tenemos una señal muy débil superpuesta al fondo de la emisión de la estrella. ¿Qué número de cuantos precisamos para detectar la señal? El número mínimo de cuantos que debemos recoger para detectar la señal, determinado por

$$N = (\Delta n/n)^{-2}, \tag{3}$$

es 10^{18}.

Para que la razón de la señal al ruido de fondo sea aproximadamente 3, necesitamos 10^{19} cuantos. Si la estrella está a una distancia de 10 parsecs, lo que tenemos de ella es 3×10^5 cuantos por centímetro cuadrado por segundo. En todo esto estoy considerando la emisión completa de la estrella en lugar del espectro visible.

Es evidente que necesitamos disponer de un producto del área del telescopio por el tiempo de observación igual a la razón de estas dos cantidades. Este valor es de 3×10^{13} centímetros cuadrados por segundo. En este caso no podemos aumentar el tiempo de acumulación de modo sustancial, porque un planeta como la Tierra se estará desplazando con una velocidad finita y el tiempo máximo sería del orden de una hora, es decir, 3×10^3 segundos. De este modo obtenemos un área igual a 10^{10} centímetros cuadrados.

En otras palabras, necesitamos un telescopio óptico con un diámetro aproximado de 1 kilómetro, lo cual no sólo es imposible ahora, sino que será imposible en los próximos mil años. Sin embargo, podemos trasladarnos a una parte diferente del espectro donde la razón entre el flujo del planeta y el flujo de la estrella sea más favorable. La distribución de energía en los espectros del planeta y de la estrella difiere substancialmente. El espectro neto presentará dos picos, uno en el visible correspondiente a la estrella y otro en el infrarrojo, correspondiente al planeta. En el caso de la Tierra, este segundo máximo estaría aproximadamente cerca de los 10 micrones.

Esto cambia de modo significativo el panorama, porque en este caso el producto área-tiempo es de 3×10^{10} centímetros cuadrados por segundo, y nos contentaremos con un área de 3×10^6 centímetros cuadrados. Esto implicaría un diámetro del orden de los 20 metros y pienso que en el transcurso de nuestra vida, en el futuro próximo aparecerán telescopios infrarrojos de ese tipo para estas longitudes de onda.

Me doy cuenta perfectamente de que quedan por resolver muchas otras dificultades técnicas. En primer lugar, la base del interferómetro ha de ser de dimensiones suficientes. Tendría que alcanzar las decenas de kilómetros, pero pienso que un sistema de este tipo podría materializarse en algún lugar, por ejemplo en la superficie de la Luna. En todo caso, un sistema así tendría que operar en el espacio exterior, por el simple motivo que si instaláramos tales telescopios en la Tierra, la sensibilidad de los receptores, aunque fueran receptores ideales, estaría limitada por el efecto de la atmósfera terrestre, su efecto de fondo. Necesitaríamos receptores con un umbral de sensibilidad de 10^{-15} vatio $(\text{herzio})^{-1/2}$. Esta cifra es dos órdenes de magnitud superior a las características de los mejores receptores infrarrojos de la actualidad, pero no veo que eso sea una objeción fundamental siempre que un sistema así se proyecte en el espacio exterior. Creo que en el futuro inmediato sería perfectamente realizable.

KELLERMANN: ¿Y con longitudes de onda más largas? ¿Cómo afectarían a la situación?

MOROZ: La razón no empeoraría; se mantendría aproximadamente igual. Pero la situación energética empeoraría mucho; perderíamos una porción importante de la energía del planeta. Disminuiría a razón de λ^{-3}. Si por ejemplo pasamos de 10 micrones a 1 milímetro, perderíamos un factor de millones en energía. Creo que eso sería fatal.

SHKLOVSKY: Si funcionara este instrumento hipotético, ¿cuántas estrellas podríamos observar?

MOROZ: Todas las estrellas en un radio de 10 parsecs: no recuerdo cuántas son.

SHKLOVSKY: Doscientas.

BRAUDE: ¿Ha hecho usted algún cálculo para la emisión no térmica?

MOROZ: No, no he hecho los cálculos, pero probablemente se podría utilizar también la emisión no térmica.

GOLD: ¿Ha pensado en la utilización para objetivos astronómicos de un interferómetro Michelson? Es concebible que pudiéramos medir el número de franjas de interferencia entre una estrella que deseamos observar y una estrella vecina, y de ese modo dispondríamos de un sistema muchísimo más preciso que ahora para realizar astrometrías.

MOROZ: No hay duda.

MORRISON: En relación muy estrecha con estas propuestas, me parece que existe la simple posibilidad de mejorar la astrometría si hay suerte, utilizando una interferometría de base muy larga en el caso que las enanas M entren ocasionalmente en erupción como sabemos que sucede con algunas de ellas. Disponemos ya de interferometrías excelentes, con bases muy largas, pero sólo en las longitudes de onda del orden de los 10 centímetros. Es muy probable que la emisión constante de un planeta o de una estrella en esta banda de frecuencias sea despreciable. Pero en el transcurso de los años incluso estrellas muy constantes presentan erupciones. Puesto que existe ya una instalación con una base muy larga que puede resolver 10^{-4} segundos de arco, si tenemos suerte, podríamos trabajar con la estrella de Barnard. Estamos pensando en ello.

MOROZ: Con estrellas pequeñas sí, pero estoy convencido de que no servirá con planetas. El flujo es muy débil.

BURKE: Doctor Moroz, me hizo el efecto que usted suponía que el detector del interferómetro iba a recibir toda la señal de la estrella. De hecho, en el caso de sistemas planetarios próximos, la separación angular de un planeta mayor y de la estrella sería de varias décimas de segundo de arco, por lo tanto podría ciertamente aplicarse algo análogo a la técnica de un coronógrafo solar; el diámetro del telescopio requerido disminuye directamente a medida que mejora la relación señal-ruido, por lo tanto, bajaríamos de 1 kilómetro a 1 metro. No creo que para ello tuviera que esperar usted mil años.

MOROZ: Quizá tenga razón. No tuve en cuenta esta posibilidad. Consideré que se recibiría toda la respuesta y pensé que resultaría difícil separar el flujo de la estrella del flujo del planeta, incluso en una décima de segundo. Siempre tendremos dispersión instrumental. Un coronógrafo nos daría posiblemente una ganancia de diez; quizá una ganancia de dos órdenes de magnitud. Creo que en el infrarrojo tendremos la misma ganancia, gracias al intervalo espectral.

PARIISKY: Me parece del todo evidente que si resultara posible construir un gran interferómetro Michelson en el intervalo de longitudes de onda de los 10 micrones, o bien no veríamos nada –por lo menos en nuestra galaxia– o bien veríamos solamente planetas, porque las estrellas en sí pueden resolverse, ya que la base es lo bastante grande. Puede aumentarse el contraste seleccionando el intervalo, o aumentando el poder de resolución de nuestro instrumento. Un ejemplo de este tipo lo constituye la labor ya realizada con instrumentos de grandes bases para fuentes discretas cerca del Sol, experimentos para comprobar la teoría general de la relatividad. Sin embargo, es evidente que este método de detección directa de planetas tiene una sensibilidad limitada.

Otro método presenta considerables ventajas, porque es prácticamente independiente de la sensibilidad. Si fuese posible realizar un interferómetro muy grande de obstáculo, se ve fácilmente que el factor limitador sería el diámetro del planeta en lugar de la distancia a él: el diámetro de la estrella en lugar de su brillo. Me refiero a medidas astrométricas mediante un interferómetro tipo Michelson, empleando como fuentes de referencia estrellas cercanas.

Tengo las siguientes estimaciones sobre la posibilidad de estas mediciones interferométricas en función de la masa planetaria detectable en el límite. Con estrellas muy brillantes, por ejemplo estrellas O, la masa límite es igual a la de Júpiter para distancias que llegan a la distancia a la nebulosa de Andrómeda. En el caso de enanas blancas es del orden de la masa de la Tierra. Y con estrellas de neutrones de pequeño diámetro, donde sería necesaria una gran precisión, es del orden de la masa de la Luna.

Parece, pues, que este método puede en todo caso competir o incluso ser más prometedor que los demás métodos propuestos. Es evidente que lo mejor sería seguir varios caminos de investigación.

Quisiera decir finalmente que en mi opinión habría que

tomar en consideración grandes interferómetros ópticos no sólo en el espacio o en la Luna, sino también en la superficie terrestre. El número de octubre de 1970 de la revista *Science* contiene un artículo sobre un interferómetro tipo Michelson que operaría en el intervalo óptico en los Estados Unidos con una base de 1 kilómetro y con conservación de fase para la onda luminosa. En cuanto al problema de la influencia de la atmósfera, se podría reducir esta influencia considerablemente utilizando puntos de referencia o con otros métodos que se discuten ya en la literatura.

MINSKY: ¿No se podría utilizar un planeta como Plutón como un coronógrafo lineal de gran alcance para la interferometría? Si se pudiese enviar un telescopio al lado opuesto del sistema solar y mantenerlo allí mediante un cohete iónico (en aquel punto la gravedad solar sería muy débil), se podría conseguir una relación señal-ruido muy buena.

SAGAN: Hay otra propuesta para detectar sistemas planetarios extrasolares mucho menos cara formulada por el profesor Frank Rosenblatt de Cornell, que falleció recientemente en un accidente trágico. Este artículo se ha publicado este año en *Icarus*.* En resumen dice:

> El tránsito de una estrella por un compañero oscuro o por un planeta provoca una «signatura» colorimétrica característica que se podría detectar por medios fotométricos. La signatura, debida a un oscurecimiento diferencial del limbo en la luz roja y azul, presenta la forma de un ligero desplazamiento hacia el azul a medida que el planeta cruza el limbo de la estrella, seguido por un enrojecimiento anormal durante el tránsito del centro de la estrella, y finalmente otro desplazamiento hacia el azul a medida que el planeta se acerca al limbo alejado. Se discute en el artículo un análisis de esta signatura, las probabilidades de detectar tales tránsitos y la posible instrumentación a utilizar en ello. Se considera realizable, a un coste moderado, un sistema diseñado para una o más detecciones planetarias por año. Este sistema consistiría en tres telescopios de gran campo, en tres puntos bien separados y subordinados a una computadora central.

SHKLOVSKY: Temo que este proyecto sufra las consecuencias de varios defectos. La actividad de la estrella, las manchas solares, provocarán cambios de color. Basta con que sean del orden de 10^{-15} y todo se echaría a perder.

* F. ROSENBLATT, «A Two-Color Photometric Method for Detection of Extra-Solar Planetary Systems», *Icarus* 14, 1971, pp. 71-93.

SAGAN: Rosenblatt discutió este punto, y muchas fuentes más de ruido. Cuando se sospecha que se ha conseguido una detección, se sabrá el período del planeta hipotético y se podrá seguir el tránsito en la siguiente ocasión. La propuesta merece perfectamente una consideración seria.

A ser posible, me gustaría introducir en este momento el tema del chauvinismo de la estrella G. Algunos de nosotros hemos supuesto durante bastante tiempo que teníamos que mirar estrellas que fuesen esencialmente de tipo espectral del Sol. Las de tipos espectrales anteriores se han excluido, como dice el profesor Gold, por motivos de edad: es decir, que no disponen del tiempo necesario para que la vida evolucione sobre sus planetas. Pero creo que no hemos sido lo cuidadosos que debiéramos al considerar estrellas de tipos espectrales posteriores. El motivo fundamental del interés que presentan las estrellas de tipo espectral posterior es doble. En primer lugar, la mayoría de las estrellas en el cielo son de tipos espectrales posteriores, y, en segundo lugar, son las más viejas. Por lo tanto, si creemos que hay escalas de tiempo críticas, por ejemplo, si el origen de la inteligencia precisa de unos cuantos miles de millones de años, o quizá diez mil millones de años, el lugar más probable donde buscar la inteligencia son los planetas de estrellas de tipo espectral posterior. Eso significa esencialmente estrellas M.

Se ha pensado, al menos algunos lo pensaron, que se podría excluir a muchas estrellas por un exceso de frío –las enanas M–, pero el resultado notable de la reducción de los datos sobre perturbaciones de la estrella de Barnard es que en todas las soluciones los planetas de masa joviana están mucho más cerca a la estrella madre que en nuestro propio sistema solar. Incluso aunque no fuese así, una estrella M0 proporciona una temperatura de equilibrio a la distancia de Mercurio aproximadamente igual a la temperatura de equilibrio del planeta Marte en nuestro sistema solar; y ha habido cierta especulación sobre la posibilidad de vida en Marte.

Si, además, los semiejes mayores de las órbitas planetarias se reducen correlativamente, si se aprietan cerca de la estrella madre, puede haber varios planetas en cada estrella M adecuados para la biología. Si esto es así, me pregunto si no deberíamos concentrar nuestra atención, en cierta medida por lo menos, en las estrellas M. Y confiaría, por ejemplo, que la estrella de Barnard se convierta en un objetivo primordial de cualquier modo de búsqueda que se emprenda.

SHKLOVSKY: Debemos tener en cuenta que las estrellas del tipo G y F comprenden casi el 20 por ciento de las estrellas. Es decir que el número de estrellas de estos tipos es colosal, e incluso si se consideraran únicamente las estrellas F y G eso no limitaría en absoluto nuestro problema en la práctica. Aunque desde luego sería muy interesante examinar también los sistemas de enanas.

SAGAN: A no ser que hubiese una constante temporal crítica. A no ser que seamos precoces. ¿Es posible que la inteligencia haya nacido en nuestro sistema en un momento estadísticamente prematuro? Si se necesitan como promedio ocho o nueve mil millones en lugar de cinco mil millones de años, tenemos que pasar a estrellas de edad correspondiente.

AMBARTSUMIAN: Recientemente salió un artículo de Wooley y colaboradores conteniendo argumentos de peso en favor de la juventud de las estrellas M, especialmente las eruptivas. Se afirmaba que sus edades son de unos 10^8 años, por lo menos las observadas en la vecindad de nuestro sol.

SAGAN: ¿Vale esto también para la estrella de Barnard?

AMBARTSUMIAN: Se trata de un cálculo estadístico.

SLYSH: Se trata también de estrellas muy frías, y creo que de momento no debemos ocuparnos del difícil problema de saber si tienen planetas. También podemos considerar el problema de la existencia de vida e inteligencia en las mismas estrellas. Todas las condiciones son allí tan adecuadas como en los planetas.

KARDASHEV: Me gustaría apoyar lo que se ha dicho aquí sobre la necesidad de tener en cuenta las estrellas frías. Me parece que, en general, la cosmología debería considerar la cuestión de la formación de sistemas planetarios sin estrellas. Es evidente en principio que la condensación puede darse, la condensación de cuerpos de pequeña masa, y que deben sobrevivir. La radiactividad interna proporciona una fuente estable y continua de energía que podría sostener el desarrollo de la vida. Las cuestiones referentes a las fuentes radiactivas serán estudiadas más tarde. Por ahora me gustaría decir únicamente que la posibilidad de la existencia de algunos planetas sin estrellas parece muy real y merece consideración.

Me gustaría también recordarles que muchos radioastrónomos consideran actualmente que es mucho más fácil detectar un sistema planetario en el momento de la formación de los planetas. Algunos sugieren que en el momento de la formación planetaria, el sistema puede emitir intensas líneas radioespectrales como la línea del vapor de agua o la línea del hidróxilo interestelar. En ese caso, la energía del intervalo infrarrojo citada por el doctor Moroz puede convertirse en un intervalo de frecuencias muy estrecho y eso mejoraría fuertemente la relación señal-ruido. Por lo tanto, los estudios interferométricos de fuentes máser anómalas pueden en el futuro próximo proporcionar información muy interesante también sobre la formación planetaria.

Me gustaría añadir que en el momento de la formación de sistemas planetarios pueden producirse cargas eléctricas muy voluminosas: eso se debe a que, en el momento de la formación, la conductividad eléctrica de una nube de gas y de polvo sería muy reducida; la formación de grandes cargas espaciales daría origen a una emisión no térmica muy fuerte, la cual podría constituir una signatura detectable de formación planetaria.

MINSKY: En relación al tema de la vida sobre planetas sin estrellas y estrellas frías, es evidente la necesidad de una fuente de energía, pero también de una fuente de energía libre, algún tipo de diferencial, y resultaría difícil que se produjeran reacciones químicas sofisticadas sin alguna especie de fuente de energía que representara alguna energía a un nivel mucho más elevado que el de la superficie planetaria. Por lo tanto, la radiactividad interna no serviría de mucho ni tampoco ayudaría el equilibrio térmico en la superficie de una estrella fría.

MOROZ: Unas cuantas palabras sobre la posibilidad de la existencia de planetas aislados en el espacio interestelar y sobre la posibilidad de vida en tales planetas. El hecho es que para sostener una temperatura de 300° K sobre la Tierra llegan del Sol unos 10^6 ergios por centímetro cuadrado y por segundo. El flujo interno o flujo procedente del interior de la Tierra es de unos 100 ergios por centímetro cuadrado y por segundo: para mantener la misma temperatura en el espacio interestelar tenemos que aumentar en cuatro órdenes de magnitud el flujo radiactivo.

¿Qué significa esto? Si la conductividad térmica de las rocas es la misma que en la Tierra, y teniendo en cuenta que

en la Tierra tenemos un gradiente (si no me falla la memoria) de unos diez grados por kilómetro, habrá un gradiente de unos 1 000° por kilómetro para los mismos 300° K. En otras palabras, un cuerpo de este tipo no sobreviviría en estado sólido. En todo caso, un cuerpo así sería radicalmente distinto a la Tierra y parece muy dudoso que pudiera sostener vida del tipo con el que estamos familiarizados.

n_e, f_l

SAGAN: Para que podamos formular algunos juicios provisionales sobre la posibilidad de vida en el exterior, tenemos que decidir hasta qué punto la vida con la cual estamos familiarizados es característica de cualquier vida posible. Puede ser que el tipo de vida existente en la Tierra constituya sólo un pequeño subconjunto de una imponente colección de posibles biologías, o quizá la vida en todas partes tenga que ser en cierto modo similar a la de la Tierra.

La historia de este problema tiene cierto interés. Está por ejemplo un libro famoso publicado hacia 1912 por Lawrence J. Henderson, titulado *La idoneidad del medio ambiente*, en el cual Henderson deduce que la vida se ha de basar necesariamente en el carbono y el agua, y que sus formas superiores han de metabolizar oxígeno libre. Personalmente encuentro esta conclusión sospechosa, aunque sólo sea porque Lawrence Henderson estaba hecho de carbono y agua y metabolizaba oxígeno libre. Henderson tenía unos intereses creados. ¿Podremos formular algún tipo de juicio objetivo libre de patriotería, independiente de nuestros prejuicios? Sólo deseo plantear este problema, no pretendo ser capaz de resolverlo.

He aquí algunos de los parámetros implicados en un intento de aproximación al problema. La primera cuestión es la fase del medio interactivo en el cual tiene lugar la química del organismo. Muchos dirán que la fase sólida impide que los ritmos reactivos sean suficientes para que sean útiles a la biología, a no ser que estén en el límite de una transición al estado líquido. Por otra parte, los medios de fase gaseosa son probablemente inadecuados porque los productos de la interacción no se mantienen. Queda, pues, la fase líquida que, por raro que parezca, es la que utilizamos nosotros. ¿Estamos ante un chauvinismo líquido?

Una posibilidad alternativa es un medio de plasma, popula-

rizado por Fred Hole en su obra de ciencia-ficción *La nube negra*. La principal dificultad con este organismo totalmente ionizado es que no hay manera de que se produzca. De hecho parece que sea inmortal y que dependa de la cosmología del estado continuo. No voy a examinar otras cuestiones sobre las perspectivas biológicas en un ambiente de plasma, pero si la respuesta fuese afirmativa, abriría un amplio dominio de ambientes astrofísicos que actualmente consideramos cerrados a la biología.

En una perspectiva limitada del problema, tendríamos que exigir que un planeta dispusiera de un líquido apropiado, posiblemente con una constante dieléctrica elevada, pero no necesariamente, y también con un intervalo líquido estable amplio. Si exigimos también que este líquido tenga una elevada abundancia cósmica, el único material posible candidato es el agua. ¿Pero hemos cubierto todos los casos, o hemos sucumbido simplemente al chauvinismo del agua?

Llegamos ahora al tema del intercambio de energía libre que precisan los organismos vivientes. Esta cuestión ha sido planteada anteriormente en nuestra discusión de modo muy interesante y contestada en parte por el doctor Minsky. Me gustaría adoptar un enfoque semicuantitativo. Un cálculo aproximado de la máxima eficiencia teórica de una máquina térmica da algo así como $\eta = (1 - T_2/T_1)$, donde T_1 y T_2 son las temperaturas respectivamente de la fuente y del sumidero. Por ejemplo, en la Tierra la fotosíntesis es impulsada por un cuerpo negro a 6 000° K, el Sol, y las plantas se encuentran sumergidas en un medio ambiente a 300° K, la Tierra; por lo tanto la máxima eficiencia posible es de un 95 por ciento. De hecho la eficiencia real de la fotosíntesis en las plantas es algo inferior, debido a otros motivos.

Consideremos ahora una planta hipotética en un planeta hipotético. En la Tierra puede haber plantas sin animales, pero lo inverso es por ahora imposible, por lo tanto, conviene limitarse a las plantas. Constituyen el depósito fundamental de energía para la biología en la Tierra. Consideremos ahora un planeta independiente de una estrella e imaginemos, como proponía el doctor Moroz, que su conductividad térmica sea sorprendentemente alta o bien que dispone de muchas más fuentes de calor radiactivo que la Tierra, con lo que su temperatura sería de 300° K. Si imaginamos que los 300° K son el sumidero, es evidente que falta la fuente; pero en cambio podríamos imaginar que la temperatura de 300° K es la fuente y que el planeta radia hacia el cuerpo negro del fondo del

espacio a 3° K. En este caso observamos que η puede llegar hasta el 99 por ciento. No tengo idea de lo probable que sería la existencia de organismos capaces de enfriarse hasta los 3° K del cuerpo negro del fondo del espacio, pero mi intuición me hace algo escéptico.

Una posibilidad relacionada con lo anterior es la vida sobre estrellas frías. Falta una superficie sólida, y el intervalo adecuado de temperaturas está en algún punto de la atmósfera de la estrella supuesta, donde la opacidad es grande. Por lo tanto, el organismo hipotético puede hacer funcionar su motor térmico a base de dos temperaturas separadas por un intervalo óptico de profundidad. Pero de acuerdo con las opacidades previstas un intervalo óptico de profundidad corresponde a una diferencia de temperatura muy pequeña; por lo tanto, deduzco que la vida en una estrella fría, según propuso originalmente Harlow Shapley, no constituye una hipótesis muy sostenible. ¿Constituye esto, sin embargo, un caso de patrioterismo planetario?

El siguiente apartado en la lista de propiedades importantes para la biología es el de la constitución atómica. En este apartado la gran variedad de compuestos empleados en la biología terrestre se debe a los enlaces del carbono. Se ha afirmado frecuentemente en la literatura que no hay otro átomo que proporcione una adecuada complejidad de moléculas, pero por una especie de privilegio del carbono se han quedado sin examinar adecuadamente otros sistemas químicos. Como es lógico, el interés de los químicos se ha centrado en el examen de su propia química y no se han investigado suficientemente grandes dominios de otras moléculas posibles.

Un punto relacionado con lo anterior se refiere a la velocidad de las reacciones químicas. En la literatura se encuentran afirmaciones sobre el Q_{10} de las reacciones biológicas, que mide el factor con que cambia la velocidad de la reacción química al cambiar la temperatura 10°C. Leyendo esta literatura uno saca la impresión de que se trata de una constante de la naturaleza. De hecho representa una especie de selección experimental de nuestra temperatura ambiente. Las reacciones químicas que proceden con una velocidad razonable a bajas temperaturas están completas en nuestra normal temperatura ambiente; las reacciones químicas que proceden con unas velocidades normales a altas temperaturas presentan velocidades despreciables a nuestra temperatura ambiente. Los químicos en planetas con temperaturas diferentes sacarán conclusiones muy distintas sobre el Q_{10} de las reacciones químicas. Hay un

amplio margen de energías de activación en las reacciones químicas, y creo que sería un gran error creer necesariamente que las temperaturas que prevalecen en la Tierra constituyen un requisito definido para la vida en otras partes. Más tarde, al tocar un tema en relación, veremos que la temperatura ambiental de un planeta dado está en función tanto del lugar como del tiempo.

Cuando nos enfrentamos con el tema de la vida fuera de la Tierra, no hay duda de que tenemos que considerar un sistema de una complejidad formidable, y un problema corriente, tanto en la literatura teológica como bioquímica, es el modo de la posible formación de sistemas de tal complejidad. Pongamos un ejemplo numérico. Una simple proteína puede constar de 100 unidades constitutivas denominadas aminoácidos, de las cuales hay 20 variedades biológicas. Por lo tanto, la probabilidad de la constitución casual en el orden adecuado de una molécula de este tipo con 100 aminoácidos es 20^{-100}, o algo así como 10^{-130}. Está claro, pues, que podríamos ir montando al azar todas las partículas elementales en el universo mil millones de veces por segundo durante toda la edad del universo y no obtener nunca esta proteína. Todavía es mucho menos probable un determinado ser humano. Las moléculas que determinan la herencia de un determinado ser humano son los ácidos nucleicos. Sus unidades constitutivas, sobre las cuales el profesor Crick pronto nos dará más detalles, son los nucleótidos. Un solo cromosoma humano contiene unos 4×10^9 de estos pares de nucleótidos. Hay cuatro pares posibles de nucleótidos. Por lo tanto, un cálculo aproximado de la improbabilidad genética de un determinado ser humano es de $4^{-4} \times 10^9$, o aproximadamente $10^{-2} \times 10^9$. ¿Cómo es posible que puedan haber llegado a formarse moléculas de tan pasmosa inverosimilitud? La respuesta nos la dio hace más de cien años Charles Darwin. La reproducción preferencial de los organismos, a través de la selección natural de pequeñas mutaciones, actúa como una especie de filtro de probabilidad, como un selector de probabilidad. Sólo hemos alcanzado la complejidad actual a través de un número enorme de muertes y de una enorme cantidad de tiempo. Falta una buena teoría que pueda predecir el tiempo necesario para alcanzar cierto grado de complejidad, pero la complejidad de las moléculas biológicas y del material genético es tan grande, que presupone un período muy largo de selección natural. No cabe duda sobre el hecho de la evolución, pero quedan pendientes cuestiones de envergadura sobre la mecánica del proceso evolutivo.

Un último punto: los organismos de la Tierra presentan similitudes sorprendentes. No solamente se basan todos en el carbono y son acuosos, sino que todos utilizan las mismas moléculas para la transmisión de la información genética, y todos utilizan las mismas moléculas para la catálisis molecular. Además el código que transcribe la información genética en los catalizadores de enzimas es el mismo, por lo que sabemos, en todos los organismos de la Tierra. Este hecho se suele denominar «universalidad» del código genético, un término que desde nuestro punto de vista quizá sea demasiado amplio, pero que constituye un hecho notable. Aunque quizá haya muchos organismos en otros planetas que sean muy similares a los organismos de la Tierra, por lo menos en su bioquímica fundamental, no podemos excluir la posibilidad de tipos muy distintos de organismos.

STENT: Me gustaría preguntar algo sobre las estrellas oscuras. No acabo de ver la imposibilidad de que existan fluctuaciones locales de temperatura sobre una estrella oscura durante las cuales las temperaturas locales superen en mucho a las de zonas adyacentes, y durante las cuales puedan sintetizarse compuestos químicos con un grado elevado de enlaces de energía, que servirían luego como una especie de combustible fósil del cual se alimentarían otros organismos y que explotarían como una fuente de energía libre.

SAGAN: Apenas servirían para mantener una pequeña población. Una población grande correría peligro de desnutrición. Es el mismo problema que se trató en una ocasión al intentar postular la existencia de organismos en el interior de asteroides. Supongamos que exista una gran cantidad de compuestos orgánicos encerrados en el interior de un asteroide, producida allí en la primitiva historia del sistema solar por los mismos tipos de química orgánica prebiológica que describiré inmediatamente; ¿por qué no podría darse la vida dentro de ese asteroide si las temperaturas fuesen adecuadas? No hay duda de que podría darse vida en estas circunstancias hasta que se agotara la reserva finita de alimento. Lo que me preocupa de su sugerencia es que las fluctuaciones en la disponibilidad de alimento producido en esta estrella podría exterminar a toda la población.

GOLD: Me siento obligado a retroceder y hacer un comentario sobre la situación energética. Me limité a decir que sería

conveniente disponer de un flujo calórico desde una fuente a alta temperatura que pasara por un cuerpo con una temperatura inferior de equilibrio. Éste es el caso de la Tierra. Pero no hay duda de que existen otras posibilidades. Podemos derivar energía libre de la superficie de un cuerpo que disponga de una fuente interna de calor, tanto si es radiactiva como si es un proceso de producción de energía en el interior de una estrella. La única exigencia que plantearíamos sería que el organismo que realiza este trabajo no esté inmerso en un fluido de elevada opacidad a la radiación adecuada para la temperatura de la superficie del cuerpo.

En la Tierra nos encontramos inmersos en aire, que es bastante opaco al infrarrojo. Pero si, por ejemplo, dispusiéramos de poca atmósfera, sería muy fácil que las plantas crecieran exhibiendo la parte inferior de su hoja al suelo y la parte superior al espacio. Éste es el método más fácil para las plantas de conseguir energía, y la vegetación crecería con un espaciamiento adecuado y cubriría el máximo de terreno posible.

También es posible imaginar energía libre en un cuerpo cuyos organismos estén inmersos en un medio opaco (como sugirió el doctor Sagan), pero en el cual, por ejemplo, se dé una sucesión regular de temperaturas. Supongamos que estoy sentado profundamente inmerso en la atmósfera de una estrella pulsante; puedo obtener energía libre haciendo que tenga lugar un cambio químico acoplado con el equilibrio en cada extremo de temperatura, y que puedan presentar entonces un retraso para conseguir el equilibrio. El problema sobre el agotamiento de las reservas de alimento dejaría de plantearse.

Una observación similar es válida para un planeta sobre el cual caiga un flujo de energía estelar muy grande, superior al que recibimos del Sol, pero que cambie espectacularmente la temperatura de equilibrio de la atmósfera durante el día.

No creo que haya vida en Venus, pero en alguna profundidad de su atmósfera podría presentarse esta situación, aunque probablemente el flujo de fotones de alta energía sea allí muy pequeño. Pero podría haber atmósferas más favorables desde este punto de vista, de modo que una atmósfera opaca constituiría un hábitat biológico perfectamente posible si experimentara variaciones diurnas de temperatura. Lo digo porque me parece que quizá nos hayamos mostrado demasiado provincianos al imaginar que el tipo especial de energía que utilizamos en la Tierra tenga que utilizarse también en otras partes.

Déjenme subrayar de pasada para quienes imaginaban que

exageraba cuando discutía hábitats biológicos de tipo únicamente terrestre, que reivindico la prioridad en la invención de la idea de la nube negra de Fred Hoyle, aunque desde luego no contribuí a la excelencia de su obra.

SAGAN: Es muy posible que yo sea culpable del mismo defecto que estaba atacando. Como demostrarán todas nuestras discusiones, es muy difícil evitar los argumentos basados en la analogía con la Tierra. La única respuesta substancial que puedo dar a lo dicho por el profesor Gold es que algunas de las circunstancias que ha propuesto, por ejemplo, estrellas pulsantes con una temperatura superficial de 300° K, no es probable que se den con mucha abundancia.

CRICK: Me gustaría hacer una observación abundando sobre lo dicho por el profesor Sagan. Se trata de que las moléculas presentes en los sistemas biológicos de la Tierra presentan una orientación definida. Giran a la derecha en lugar de a la izquierda. Voy a aclarar este punto. Si cogemos una molécula de ácido nucleico y la miramos por un espejo, la molécula reflejada no existe en la Tierra. Éste es otro elemento que hay que añadir a lo ya dicho, común a todo organismo terrestre. Pero sugiero que no perdamos el tiempo preguntando por qué las moléculas presentan un sentido y no el otro.

Me gustaría en cambio discutir en términos generales el sistema biológico que tenemos en la Tierra, y en especial cómo tenemos que planteárnoslo cuando consideramos su origen. La primera exigencia (mencionada ya por el doctor Sagan) que me gustaría subrayar como propiedad general de todo sistema biológico es que debe presentar una gran versatilidad. En otras palabras, el sistema debe ser capaz de realizar un gran número de cosas muy distintas. Tiene cierto interés preguntarse cómo lo consigue el sistema actual.

Para discutir el tema tenemos que preguntarnos a qué clase de actividad nos referimos. La actividad que creo necesitamos casi con certeza es la actividad catalítica. Eso exige una estructura tridimensional, porque si bien (como ya hemos oído) ha de tener lugar en una fase líquida, necesitamos algunas cosas sólidas en esta fase líquida, no sólo para la actividad catalítica sino para conservar la información genética. La solución a este problema se consigue a base de polímeros; es decir, de proteínas y de ácidos nucleicos. El método utilizado por la naturaleza para construir estructuras tridimensionales no se comprende sólo a base de métodos combinatorios (que es el punto

discutido por el doctor Sagan); hay un mecanismo adicional.

No resulta fácil copiar una estructura tridimensional. El mecanismo utilizado por la vida en la Tierra consiste en almacenar la información en los ácidos nucleicos, que tienen una estructura unidimensional especialmente adecuada para su reproducción, pero que (en la forma actual) no presenta una versatilidad notable en las actividades catalíticas o de otro tipo; y luego traducir de un lenguaje de cuatro letras, el de los ácidos nucleicos, al lenguaje de veinte letras de las proteínas, para construir un tipo de moléculas que se plegará sobre sí y dará una estructura tridimensional. Ésta es una descripción general de la vida tal como la vemos en la Tierra. Ahora vamos a considerar las características del sistema que son esenciales.

Voy a suponer de momento que nos limitamos a la selección natural y a volver sobre este punto. Tenemos que preguntarnos: ¿cuáles son las propiedades que ha de tener un sistema molecular que presente una selección natural? La primera propiedad que necesitamos es que exista la reproducción geométrica. No basta la reproducción aritmética, que se parece a la producción de un periódico a partir de una prensa donde se obtienen muchas copias a partir de un objeto; en nuestro caso hay que hacer copias de las copias.

Tenemos que discutir ahora las mutaciones: es decir, cambios, accidentales o de otro tipo, en la secuencia que estamos tratando. Una segunda exigencia de nuestro sistema es que el mecanismo de reproducción sea capaz de copiar las mutaciones, es decir, los «errores».

El siguiente requisito es que el producto, sea cual fuere, como hemos visto en la primera parte de la discusión, sea capaz de influir sobre el espacio que lo envuelve de un modo versátil. Hay otros requisitos que no discutiré, como el de mantener una unidad entera del sistema en un saco, en un lugar, pero de momento dejo de lado este punto.

Las proteínas, que son muy eficaces en cuanto a la actividad catalítica, parece que, en la forma en que las tenemos, no son muy eficaces como simple mecanismo de reproducción. La naturaleza, por lo tanto, ha utilizado este sistema de dos lenguajes, uno adecuado para la reproducción y el otro adecuado para la expresión, y ha inventado un aparato muy complicado para traducir de un lenguaje al otro los resultados del cual constituyen nuestro código genético.

Tenemos que considerar ahora el problema de los orígenes. Para simplificar las ideas, vamos a pensar en el momento (que

puede durar más de un momento) en que la selección natural empezó a actuar, aunque quizá lo hiciera de una forma muy primitiva e inexacta. La gente que trata del origen de la vida suele decir convencionalmente que, una vez alcanzado este punto, el problema quedó resuelto. El motivo es que todo lo que sucedía antes tenía que producirse por casualidad. Sin embargo, debemos recordar que vivimos en un mundo que está estructurado por la naturaleza de la química y de la física; por ejemplo, el anillo de benceno es algo estable gracias a la naturaleza de la química. En el origen de la vida sobre la Tierra debió de jugar un papel muy importante la acción catalítica de algunos minerales que también existen gracias a las reglas de la química. Por lo tanto, no tenemos que utilizar demasiado a la ligera la palabra «azar».

Dicho esto, y habiendo dicho que se disponía de gran parte de la primera química para constituir lo que según creo llaman la «sopa», no llegamos a ver todavía un camino fácil, con un grado razonable de probabilidad, que nos lleve de la «sopa» al punto inicial de la selección natural. Una persona racional que disponga solamente de la información del momento actual podría deducir razonablemente que el origen fue un milagro, pero eso refleja de nuevo nuestra ignorancia sobre el tema. El punto que estoy tratando conduce a la siguiente conclusión: en el estado actual de nuestro conocimiento de la bioquímica nos es imposible obtener cualquier estimación razonable del factor f_l en la ecuación (1). Uno se siente fuertemente inclinado psicológicamente a postular que este factor tendrá un valor cercano a la unidad, pero sólo disponemos de un ejemplo, que no es suficiente para basar en él cualquier clase de probabilidad. Debemos afirmar que hasta disponer de más información no estamos realmente en disposición de hacer suposiciones sobre el tema.

Puesto que he descrito la naturaleza del sistema en la Tierra, voy a explicarles mi prejuicio psicológico: Creo probable que en otro planeta la vida se basará también en módulos pequeños y complicados en un líquido, pero no estoy en disposición de discutir los detalles de estas alternativas. Les he dado solamente el marco dentro del cual puede llevarse a cabo esta discusión.

Para terminar quisiera citar dos puntos que presentarán algunos problemas generales no resueltos. La primera cuestión es la siguiente: Vemos que en la Tierra hay dos moléculas, una de las cuales sirve para la reproducción y la otra para la acción. ¿Es posible imaginar un sistema donde una molécula

realice las dos tareas, o existen argumentos de peso a partir del análisis de sistemas que pudieran indicar (si existen) que la división del trabajo en dos partes proporciona una ventaja real? Es una cuestión cuya respuesta desconozco.

La segunda cuestión fue mencionada al hablar de la selección natural. Probablemente podríamos estar de acuerdo en que la herencia de los caracteres adquiridos nos es corriente, por lo menos en la Tierra, pero una buena cuestión general sería preguntar si puede diseñarse un sistema basado en la herencia de los caracteres adquiridos. Esta cuestión general, a mi entender, no se ha tomado en cuenta seriamente. Cuestiones similares han recibido respuesta; por ejemplo, R. A. Fisher ha demostrado que no puede existir herencia por mezcla sino que la herencia ha de ser por partículas; por lo tanto, no es imposible elaborar argumentos generales en algunos casos siguiendo estas líneas.

MINSKY: La bioquímica está ya lo suficientemente avanzada para poder diseñar una cadena bidimensional, mejor que tridimensional, con su substrato, y por lo tanto quizá sea más interesante diseñar formas de vida muy simples bidimensionales, es decir, buscar las condiciones de la organización actual, y, una vez halladas, ir retrocediendo para ver si puede construirse una ligeramente más sencilla. El camino inverso hacia una complejidad menor es probablemente más fácil que el camino ascendente.

CRICK: Creo que estamos de acuerdo en que podría imaginarse un sistema bidimensional, pero sus observaciones podrían generalizarse un paso más. Es posible imaginar el plegamiento de los ácidos nucleicos de un modo tridimensional y eso podría responder a lo que dice.

MINSKY: Pero una vez plegados se necesitan más mecanismos para reproducirlos.

CRICK: Creo que la producción de modelos es demasiado fácil, y ahora voy a producir uno. Puesto que creemos que los planetas giran, podemos pasar por todos los tipos de variaciones de temperatura de modo que la misma molécula esté en tres dimensiones en la temperatura más baja y en una dimensión en la temperatura alta.

¿Puedo hacer un paréntesis? Nos hemos convencido en las últimas semanas de que los mecanismos de control en los

organismos superiores dependen de un plegamiento intrincado del ADN en tres dimensiones, pero en este caso con la ayuda de una o dos moléculas subsidiarias.

SLYSH: Doctor Sagan, cuando discutía las estrellas negras, usted dijo que la cantidad de energía libre en estas estrellas era inadecuada. Me gustaría que diera algunas estimaciones cuantitativas, si es posible, sobre la cantidad de energía libre, por ejemplo por unidad de masa o de otra manera, que necesitan las plantas y los organismos para la vida.

SAGAN: Esto encajará perfectamente en mis observaciones siguientes. Se me ha pedido ahora que diga algunas palabras sobre la química orgánica prebiológica. La cuestión que se plantea es de qué modo las moléculas, esas pocas moléculas responsables de la biología terrestre, llegaron en su momento a existir.

El número de moléculas utilizadas realmente en los sistemas biológicos es notablemente inferior al número de posibles moléculas orgánicas. Hay miles de millones de posibles compuestos orgánicos. De ésos, menos de 1 500 se utilizan en la Tierra, y esos 1 500 se basan en 50 bloques constructivos más simples. Los más importantes de estos bloques constructivos son los aminoácidos, los bloques constructivos de las proteínas, y los azúcares y bases, los bloques constructivos de los ácidos nucleícos. ¿Cómo podemos comprender la producción prebiológica de tales moléculas?

Supongamos que las imagináramos constituyéndose en el ambiente actual; podríamos tomar una mezcla de los gases en la atmósfera actual de la Tierra, suministrarle energía, quizás en forma de descarga eléctrica o de luz ultravioleta, y ver las moléculas que conseguimos. En estas circunstancias obtenemos algo de polución: ozono, óxidos de nitrógeno, etc., pero no lo que deseábamos lograr.

Supongamos luego que recordamos que el oxígeno de la atmósfera terrestre es producido por la fotosíntesis de las plantas verdes; no podía haber plantas verdes antes del origen de la vida, por lo tanto cogemos los mismos gases, pero sin oxígeno; es decir, agua, dióxido de carbono y nitrógeno, y suministramos de nuevo energía a la mezcla. En ese momento conseguimos moléculas como formaldehído, no exactamente lo que queríamos pero en camino; porque los azúcares son los polímeros de aldehídos. El cambio efectuado está en el sentido de unas condiciones menos oxidantes y más reductoras. Las

substancias bioquímicas tienen en proporción mucho más hidrógeno que la atmósfera actual de la Tierra.

Recordemos en este momento que el universo está compuesto principalmente de hidrógeno. Los átomos más abundantes en el universo son hidrógeno, helio, carbono, nitrógeno, oxígeno y neón. Puesto que hay un exceso de hidrógeno, en los cuerpos fríos las moléculas que se espera encontrar son los hídridos totalmente saturados de esos átomos. Así, el hidrógeno estará presente en forma de molécula (H_2), el helio como helio, el carbono como metano (CH_4), el nitrógeno como amoniaco (NH_3), el oxígeno como agua (H_2O) y el neón como neón. Por lo tanto, es razonable suponer que la primitiva atmósfera de la Tierra estaba compuesta de estas moléculas.

La teoría de las exosferas planetarias demuestra claramente que el hidrógeno puede escapar de la Tierra con las temperaturas actuales de la exosfera y a lo largo del tiempo geológico en cantidades muy substanciales, mientras que los átomos más pesados que el helio no pueden escapar en absoluto. Por otra parte, planetas como Júpiter tienen unas masas tan grandes y unas temperaturas en su exosfera tan bajas, que ni el hidrógeno podría escapar durante un tiempo geológico. Es por lo tanto muy reconfortante descubrir que la composición atmosférica de Júpiter es probablemente parecida a esta mezcla de H_2, He NH_3, CH_4, Ne y H_2O pero con el agua a una profundidad tal que nos resulta imposible verla espectroscópicamente a causa de su baja presión de vapor a bajas temperaturas.

Con este estímulo podemos repetir de nuevo el experimento: mezclar metano, amoniaco y agua, suministrarle energía a la mezcla y ver qué moléculas se forman. El primero de estos experimentos fue realizado hace casi veinte años por Stanley Miller, quien observó que se formaban aminoácidos. Desde entonces se ha realizado una gran variedad de experimentos de este tipo, por ejemplo en el laboratorio del profesor Orgen y en nuestro laboratorio de Cornell, y hemos descubierto no sólo que se producen aminoácidos con un elevado rendimiento sino también las bases y los azúcares nucleótidos, y de hecho todos los pequeños bloques constructivos fundamentales de la bioquímica.

Como ejemplo de los rendimientos de moléculas habituales en tales ensayos, hemos llevado a cabo una serie de experimentos de irradiación con luz ultravioleta de elevada longitud de onda sobre mezclas de estos gases, más pequeñas cantidades de H_2S, sulfuro de hidrógeno. H_2S es el aceptor de fotón. Producimos aminoácidos con un rendimiento cuántico $\sim 10^{-5}$.

Los modelos de la evolución solar nos permiten saber cuál era el flujo de fotones del primitivo Sol y podemos calcular así qué cantidad de aminoácidos produjo la radiación ultravioleta del Sol durante, por ejemplo, los primeros mil millones de años de la historia de la Tierra. Si suponemos para el cálculo que no hubo destrucción de aminoácidos (suposición desde luego incorrecta), en los primeros mil millones de años se sintetizaron algo así como 200 kilos de aminoácidos por centímetro cuadrado de la superficie de la Tierra. Esto supera la cantidad de carbono disponible. Si se introducen velocidades adecuadas de destrucción de aminoácidos a partir de la degradación térmica de esas moléculas se obtiene un rendimiento que, mezclado con los actuales océanos de la Tierra, daría una solución de aminoácidos de unos cuantos por ciento.

La física y la química están construidas de tal modo que bajo condiciones planetarias primitivas muy generales se producen grandes cantidades de los compuestos orgánicos correctos, aquellos de que estamos compuestos. Esos experimentos no contienen nada específico de la Tierra, ni en su composición ni en la fuente de energía. De hecho hemos realizado experimentos simulando la atmósfera actual de Júpiter, que comprende los mismos gases en condiciones algo distintas, y sin que nadie se sorprenda continuamos produciendo muchos aminoácidos. Observaciones similares son válidas para azúcares y bases. En las historias primitivas de los planetas, en toda la Galaxia ha de haber una producción eficiente de todas estas moléculas. Precisamente las moléculas que necesitamos se obtienen en las condiciones planetarias primitivas más generales.

Este resultado experimental nos inclina a pensar a algunos de nosotros que la probabilidad del origen de la vida es más bien elevada, aunque comprender la producción de los bloques constructivos de proteínas y ácidos nucleicos no se parece nada a la comprensión del origen de la vida: creo que este último hecho originaba el escepticismo del profesor Crick sobre la capacidad de establecer cualquier valor cuantitativo para f_l en la ecuación (1).

El registro paleontológico se ha extendido ya hasta muy lejos en el pasado; conocemos actualmente microorganismos fósiles que tienen por lo menos 3 200 millones de años. Se trata de algas azules-verdes y bacterias, o al menos así las han identificado paleobotánicos competentes. Estos organismos son muy complejos si uno se atiene a la microestructura y funciones de las variedades contemporáneas. Además, los fó-

siles descubiertos hasta el momento muy probablemente no son los más viejos que se lleguen a encontrar. Por lo tanto, el intervalo de tiempo entre el origen de los primeros microorganismos que debieron de ser mucho más sencillos que bacterias o algas y el origen de la Tierra no es muy largo: sólo unos pocos centenares de millones de años o menos. Creo que éste es un argumento bastante persuasivo en favor de un origen rápido de la vida sobre la primitiva Tierra. Puesto que no conocemos ninguna condición específica de la Tierra primitiva que no pueda repetirse sobre millones de otros planetas por toda la Galaxia, tengo el presentimiento, la idea, de que el origen de la vida es un acontecimiento muy probable. No se trata en este caso, desde luego, de una probabilidad estadística en el sentido de un cómputo de casos, sino de una probabilidad subjetiva en el sentido descrito por Fine (apéndice A) al que me he referido anteriormente.

Sabemos ya que algunos tipos de meteoritos tienen aminoácidos y grandes cantidades de otros compuestos orgánicos. Tenemos buenas razones para pensar que los cometas disponen de muchos compuestos orgánicos. Hay actualmente una cantidad grande y creciente de pruebas sobre la producción de toda una variedad de compuestos orgánicos en el espacio interestelar, incluyendo CO, HCN, CH_3CN, HCHO, CH_3CHO, y HC_2CN, especialmente en las nubes densas. Pero todas estas pruebas se limitan a confirmar lo que ya sabemos: que la producción de substancias químicas orgánicas es fácil. Lo que necesitamos es un laboratorio planetario donde la química orgánica se haya desenvuelto por sí sola durante unos cuantos miles de millones de años. Esto nos lo proporcionan Marte, Júpiter y otros planetas, y si no se produce una contaminación inadvertida de tales planetas por microorganismos de los vehículos espaciales de la Tierra, quizá sea posible en los próximos diez o veinte años transformar nuestra estimación de f_l de probabilidad subjetiva en probabilidad estadística.

Una vez que se ha desarrollado un sistema molecular capaz de evolución mediante la selección natural, gran parte del desarrollo sucesivo de la vida se hace comprensible, por lo menos en principio. Creo que el elemento central en el problema del origen de la vida es el origen de la autorreproducción y del código genético, no el origen de la célula. Una vez puesta en marcha la evolución, las ventajas selectivas son obvias: las membranas celulares sirven para proteger del medio ambiente los sistemas vivientes; la reunión de células y la formación de los primeros eucariotas y metazoos sirve para especializar las funciones; el origen de las primitivas neuronas sirve para la comunicación entre células.

MUKHIN: Tal como ha dicho el profesor Sagan, la opinión más extendida actualmente es que los predecesores de los compuestos más complejos se formaron a consecuencia de la acción, sobre una mezcla de gases, de fuentes de energía como descargas eléctricas, radiación ultravioleta, radiactividad, ondas de choque y radiación térmica. Me gustaría señalar que la posible correspondencia entre los experimentos de laboratorio, los modelos de laboratorio y las condiciones dominantes hace miles de millones de años constituye una cuestión para la que por el momento carecemos de respuesta.

Es importante también la cuestión de la estabilidad de los compuestos orgánicos que se formaron. Esto resulta esencialmente claro a partir de las actas de la Conferencia de Wakulla Springs sobre el origen de la vida. Se produjo entonces una discusión bastante acalorada sobre el artículo del profesor Fox.* Las objeciones principales que se plantearon al orador se referían a si las condiciones de laboratorio se correspondían con las condiciones reales de hace muchos miles de millones de años. Me gustaría ofrecerles un modelo de la formación de compuestos orgánicos simples en el océano primordial donde la fuente de energía y la fuente de los reactantes iniciales fueron volcanes submarinos. Yo subrayaría el hecho de que en este modelo los volcanes son fuentes tanto de la materia inicial como de la energía necesaria para la síntesis orgánica.

Los volcanes son probablemente un factor suficientemente general en la evolución de la historia geoquímica de la Tierra, y podemos considerar que esta fuente fue la causante de la formación de compuestos orgánicos, de moléculas orgánicas: de hecho es una fuente tan legítima como la radiación ultravioleta y otras fuentes. Dentro de la esfera de acción de un tal volcán submarino disponemos de un margen suficientemente amplio de diversos factores. Podemos suponer que la temperatura va de los 20° C a los 1 000° C, y si consideramos al volcán como nuestro vaso reactivo la presión puede suponerse que va, por ejemplo, desde 5 a 500 o 1 000 atmósferas. Finalmente, los volcanes son fuentes de gases como amoniaco, hidrógeno, monóxido de carbono, metano, sulfuro de hidrógeno, los halógenos y muchos más. El agua constituye el 90 por ciento de los gases emitidos por un volcán.

* S. W. FOX, ed., *The Origin of Prebiological Systems*, Nueva York, Academic Press, 1965.

Disponemos, pues, de una mezcla suficientemente versátil de substancias químicas y un margen suficientemente amplio de factores físico-químicos. La reacción puede tener lugar tanto en la fase gaseosa como en la líquida, con la participación de agentes catalíticos de estado sólido. El profesor Crick ha mencionado el papel de estos catalizadores de fase sólida en la formación de compuestos orgánicos. No hay duda de que la erupción de un volcán se ve acompañada por la emisión de un conjunto suficientemente amplio de minerales que poseen tales propiedades catalíticas, y una erupción volcánica deja en libertad una buena cantidad de fósforo, que, según sabemos, juega un papel esencial en el proceso de la vida.

Compuestos más complejos como los aminoácidos, las bases de los ácidos nucleicos y otros se pueden producir fácilmente a partir de tipos más primitivos de compuestos como formaldehído, cianuro de hidrógeno y otros. Por lo tanto, para determinar la validez de este modelo sólo tenemos que demostrar las reacciones que conducirían, por ejemplo, a la formación de HCN. Los volcanes producen amoniaco y monóxido de carbono, y ya sabemos que la reacción del amoniaco y del monóxido de carbono produce inevitablemente HCN; del mismo modo, la reacción entre monóxido de carbono e hidrógeno produciría inevitablemente compuestos del tipo aldehídos. El profesor Sagan y otros han indicado en sus artículos que estos compuestos son los precursores de prácticamente todas las moléculas biológicamente activas.

Es indudable que el modelo que estoy presentando no excluye la posibilidad de que otros mecanismos jueguen su papel, y posiblemente la única ventaja que ofrece sobre otros modelos es el hecho de prestarse a una comprobación experimental en condiciones hoy en día naturales.

ORGEL: Las observaciones del doctor Mukhin plantean una cuestión muy general: Nuestros puntos de vista más bien conservadores sobre el tiempo y el espacio precisado para el origen de la vida ¿están apoyados por algún dato teórico o experimental? La suposición habitual es que la evolución de la vida tuvo lugar en una amplia zona geográfica y ocupó un período de centenares de millones de años. No conozco ninguna prueba experimental que señale esta dirección. No conozco ningún cálculo teórico que nos proporcione ninguna clase de pista sobre el tiempo precisado por los orígenes de la vida. Creo que el preguntarse por qué la vida no podía haber necesitado un millón de años para hacer su aparición en una pequeña zona volcánica o en alguna otra pequeña área especializada constituye un interesante desafío. Una vez inventada la fotosíntesis, la vida se habría independizado de cualquier condición especial necesaria para ella. Me gustaría oír la opinión del doctor Sagan y de otros sobre esta cuestión.

SAGAN: En primer lugar existen *algunos* datos experimentales relacionados con el tema. Disponemos de un límite superior probable para el plazo de tiempo necesario en el origen de la vida, a saber, algo así como 1 000 millones de años, según el registro fósil. Esto constituye una información relevante. Pero la cuestión que usted plantea es si el tiempo pudo haber sido mucho más corto que 1 000 millones de años. He sugerido que quizá fuera de 100 millones de años, pero acaso sea mucho menos: en otra época la propuesta popular fue de seis días. Es cierto que pudo haber durado solamente un millón de años, pero no veo de qué manera conseguiremos una respuesta.

En cuanto a los medios ambientes especiales, valdría la pena tomarlos en cuenta si tuviésemos dificultades para comprender la producción de esas moléculas en condiciones más generales. Pero no parece que tengamos dificultades de este tipo, por lo menos con los pequeños bloques constructivos. En cambio, por ejemplo para la polimerización, quizá fuera muy útil disponer de locales especiales: el profesor Crick mencionó uno, y otros han dado más alternativas: por ejemplo, sobre la superficie de minerales como la montmorillonita o la hidroxiapatita. Lo que encuentro interesante en la última sugerencia es que permite al fósforo tener un papel en el origen de la vida que no guarda relación con su escasa abundancia cósmica.

Tendemos a considerar los ambientes planetarios como algo homogéneo en el espacio y en el tiempo, pero eso no es correcto. Por ejemplo, en casi todos los manuales de astronomía se excluye la posibilidad de vida en Júpiter aduciendo las temperaturas extremadamente bajas, pero estas temperaturas son válidas únicamente para las capas de nubes más exteriores. De hecho el mismo argumento podría aplicarse para excluir la vida sobre la Tierra. Los mejores modelos contemporáneos de Júpiter muestran que existe un ambiente muy agradable a cierta profundidad bajo las nubes visibles, donde muy probablemente hay agua líquida, una temperatura de 300° K y precisamente la colección de moléculas que necesitamos para el origen de la vida, por lo menos en la fase gaseosa. Eso constituye un ejemplo de heterogeneidad en el espacio. La heterogeneidad en el tiempo depende del tipo de atmósfera en juego.

Mediante las reacciones químicas con el suelo, la huida del hidrógeno al espacio, y mediante el efecto de invernadero son probables cambios complejos e interesantes en el tiempo, tanto de las temperaturas superficiales como de la química atmosférica de los planetas.

MORRISON: Aunque la discusión es muy interesante, me parece que tiende hacia dos objetivos distintos sin quizá llegar a separarlos. Si digo que un microambiente especial puede ser muy útil, continúo creyendo que la probabilidad de la aparición de la vida se ve aumentada por un fondo general de fabricación y síntesis de compuestos orgánicos mediante fuentes de energía a gran escala. Por ejemplo, supongo que la aportación solar es un millón de veces superior a la aportación de energía de los volcanes. Esto no excluye en absoluto que los volcanes o las charcas secas o los géiseres o la espuma del mar o cualquier cosa que tengan en la cabeza deje de ser un lugar muy útil. Pero al no tener pruebas en contra del recurso a un período de tiempo largo, 10^9 años, me parece que podemos utilizar el fondo general y confiar que en condiciones adecuadas el origen de la vida se produjo quizá de muchos modos.

Por lo tanto, y vuelvo a la energía libre solar, que es una fuente de energía disponible y además la fuente de energía biológica primaria aunque no es en absoluto la única: hay microorganismos que trabajan mediante la conversión de ferroso en férrico. Me parece que todavía estamos muy justificados para decir que la presencia de la radiación de una estrella constituye una fuente de energía muy importante sobre la cual hay que superponer otros acontecimientos para tener el origen de la vida.

GOLD: Creo que la cuestión de los volcanes o de otra fuente de energía debería tomarse muy en serio por la gran dificultad con que topó la primitiva biología. Creo que los volcanes, que constituyen una fuente evidente de energía, tanto por las substancias químicas que proporcionan, que no están en equilibrio con la química normal de su entorno, como por el calor que dan, podrían constituir muy bien fuentes significativas de energía.

Además se pueden imaginar fuentes químicas de energía que derivan de las diferentes condiciones de equilibrio sobre diversas partes de la Tierra: por ejemplo, puedo imaginar que el equilibrio químico en el curso superior de un río es en cierto sentido diferente del de más abajo, y si ese río transporta hacia abajo algunas substancias químicas, la disponibilidad de esas substancias que no están localmente en equilibrio constituiría una fuente de energía. Esas fuentes de energía existen hoy en día en la Tierra, pero son más bien pequeñas comparadas con el suministro de la energía obtenida por fotosíntesis. Pero en tiempos antiguos quizá fueran las fuentes importantes. Por lo tanto, me gustaría añadir a la historia volcánica del doctor Mukhin la consideración del transporte de substancias químicas de una región a otra donde, por estar en desequilibrio, constituyen una fuente efectiva de energía. Los ríos que van de una región caliente a otra más fría constituirían un ejemplo que hace al caso.

ORGEL: Me gustaría plantear otro tema que considero de gran interés, a saber si el factor f_1 va río arriba. Sé que el doctor Crick desea hablar sobre ello; y también el doctor Sagan.

CRICK: Creo que deberíamos subrayar las dificultades teóricas y experimentales que entraña explicar el origen de la vida en la Tierra. Supongo que han oído que no hay problemas serios en relación con dos cosas. Una es la disponibilidad o la síntesis de los bloques constructivos simples. La otra es el suministro de energía. Este suministro no nos preocupa porque creemos que allí se disponía de suficiente energía química, y que una vez puesto en marcha el sistema podía cuidarse por sí solo. El problema que tiene que preocuparnos es cómo poner en marcha el sistema, y esto constituye un problema que podría describirse aproximadamente como de información, más que de energía.

Entiendo por «información» la unión de los bloques constructivos para formar polímeros y en segundo lugar para formar los polímeros correctos. La dificultad con que nos encontramos es la producción de polímeros que puedan proceder luego a alguna clase de reproducción. Los polipéptidos se pueden producir fácilmente, pero no se reproducen. Tampoco es muy difícil imaginar la polimerización de ácidos nucleicos que pueden reproducirse fácilmente. Tras producir polímeros al azar, tenemos que preguntarnos con preocupación la probabilidad de construir polímeros que o bien presenten la secuencia correcta o bien una familia correcta de secuencias. Ésta es la probabilidad sobre la cual no podemos hacer por el momento –y confío que no para siempre– una estimación razonable.

Quiero discutir ahora la postura del profesor Sagan. Al comprobar que hace 3 000 millones de años había ya organis-

mos formados y que sólo nos quedan otros 1 000 millones de años para empezar a preparar la sopa, él argumenta que el tiempo necesario para alcanzar el despegue pudo haber sido sólo, como dijo, de 100 millones de años, aunque, como dijo el doctor Orgel, pudo haber sido incluso más corto. Por lo tanto, la fuerza de su argumento es que aunque hubiese durado diez veces más en otro planeta, el hecho no hubiera tenido mucha importancia. Pero lo que nos preocupa es ese factor de 10, y la diferencia hubiera sido muy importante si el factor de 10 resultase un factor de 10^6.

Lo que la evidencia bioquímica demuestra es que en cierto sentido hubo un acontecimiento único. Lo sabemos a causa de la homogeneidad de la bioquímica de los diferentes organismos, pero ignoramos cuál fue esta homogeneidad en el momento del despegue. Lo único que podemos decir es que en alguna fase nuestros antepasados tienen que haber pasado por una población reducida, pero no podemos entender qué fue esa fase; tampoco podemos obtener una estimación que nos diga si el acontecimiento único pudo haber sucedido varias veces, porque una vez llegada al punto de despegue, esta forma elemental de vida pudo propagarse por toda la Tierra y esto pudo suceder en un corto intervalo de tiempo, más corto que el tiempo necesario para que se diera aquel acontecimiento. Si sólo disponemos de esta base, no podemos realizar una estimación de la frecuencia del acontecimiento. Disponemos de argumentos subsidiarios, que pudo haberse producido una competición y que salió ganador un sistema. Pero todo esto no nos ayuda en absoluto.

Y ahora, para que quede patente la diferencia entre mi posición y la del profesor Sagan, tengo que hacer una analogía y lamento que sea tan convencional. Imaginemos una persona a la que se han servido unos naipes. La característica es que se ha de presentar una secuencia particular, una combinación particular de cartas. Sabemos que ese acontecimiento es raro y que no es razonable tratar de estimar la probabilidad del acontecimiento simplemente porque nos ha sucedido a nosotros. El argumento del profesor Sagan es que hay abundancia de cartas. Pero disponemos sólo de un acontecimiento, y la teoría estricta de probabilidades dice que no se nos permite a base de eso deducir una probabilidad. Esto se denomina probabilidad estadística. Tenemos que referirnos, pues, a este otro concepto, la probabilidad subjetiva, a la cual recurren tanto los hombres de negocios en los Estados Unidos como los científicos en la Unión Soviética para proyectar sus investigaciones. Pero esta probabilidad subjetiva se basa en la capacidad de la mente humana para ver relaciones entre cosas, a partir de experiencias pasadas, que no están formalizadas claramente; y ésta es la herramienta que todos los científicos imaginativos utilizan en el cumplimiento de su labor. Pero en nuestro problema actual nos falta la experiencia sobre la cual formar estos presentimientos. En mi opinión, por lo tanto, no resulta legítimo apelar a la probabilidad subjetiva, y así nos encontramos en un estado de ignorancia que confío el futuro reducirá.

SAGAN: Estas observaciones provocativas del profesor Crick no se refieren solamente al factor f_l sino también a los factores f_i y f_c y L de la ecuación (1), que constituyen problemas más difíciles todavía, y con los cuales tendremos que enfrentarnos en discusiones sucesivas.

No estoy de acuerdo con esa falta de información pertinente. Además de la información paleontológica que hemos discutido, está el trabajo sobre la reproducción abiológica de polinucleótidos. Creemos observar una secuencia directa desde el ambiente primitivo hasta unos ácidos nucleicos que se autorreproducen crudamente. Pero el origen del código genético continúa sin resolver. Desde luego, es cierto que todavía no disponemos de experimentos sobre el origen, a partir de los gases y aguas primitivos, de la Tierra primeval, de sistemas mutantes autorreproductores que interaccionen fuertemente con su ambiente. El profesor Crick y yo estamos jugando a diferentes juegos de cartas. No creo que en su interesante analogía del juego de cartas haya una sola secuencia de cartas ganadoras. Confío en que haya muchos caminos que conducen al origen de la vida, y que la probabilidad conjunta de que se haya seguido uno de ellos en un planeta adecuado a lo largo de miles de millones de años resulte más bien elevada; pero ¿cómo podemos resolver esta diferencia de opinión?

Creo que la consecuencia principal de su argumento es que da todavía mayor importancia a la búsqueda de vida en planetas como Marte y Júpiter. En el caso de Marte hay un amplio campo de posibilidades, desde los restos de substancias químicas orgánicas prebiológicas hasta microorganismos contemporáneos; la posibilidad incluso de formas más avanzadas de vida. Philip Morrison ha subrayado que el descubrimiento de vida en Marte convertiría el origen de la vida de un milagro en una estadística.

CRICK: Quiero añadir algo porque creo que tiene una aplicación general a todos los factores en la ecuación (1).

Lo que tratamos de estimar en aquella ecuación es la magnitud de los diversos factores, pero hay otra cosa que tenemos que preguntarnos, a saber, la confianza de cada estimación. Lo que yo intentaba decir en relación a f_1 era que la confianza de nuestra estimación resultaba muy baja. Pero eso no se ha de interpretar en el sentido de que la probabilidad en sí sea muy baja. Es importante tener presentes con claridad en la mente estos dos conceptos: disponer de un espectro de posibilidades, a cada una de las cuales se puede atribuir una estimación de confianza.

SAGAN: Estoy totalmente de acuerdo con eso. Para que la cosa quede completa tendríamos que mencionar por lo menos la hipótesis de la panespermia. Según esta idea los microorganismos pueden haber sido transportados flotando de un planeta de una estrella a un planeta de otra estrella, quizá por la presión de radiación estelar o quizá incrustados en un cometa interestelar o un meteorito. Al discutirlo en el almuerzo con los doctores Crick y Orgel descubrí que, por lo menos de un modo menor, existe una ventaja al explicar la «universalidad» del código genético si se imagina que el origen de la vida en la Tierra fue iniciado por estos microorganismos del exterior.

La hipótesis panespermática fue propuesta originalmente por Svante Arrhenius en una época en la que se carecía de toda información sobre cómo pudo haberse originado la vida. Era una manera de eludir el problema más que de enfrentarse con él; a saber, se proponía la llegada aquí de la vida procedente de otra parte y se ignoraba toda pregunta sobre su origen en ese otro lugar.

Acabamos de completar una serie de cálculos utilizando toda la teoría de Mie, que dan el siguiente resultado: los microorganismos que son expulsados por la presión de radiación a partir de un determinado sistema solar acumulan una dosis de radiación estelar tanto en rayos ultravioletas como en rayos X, que es de mil a diez mil veces la dosis media letal de la mayoría de organismos terrestres conocidos resistentes a la radiación. Los organismos que son bastante grandes para no morir, no son expulsados por la presión de radiación. Se pueden «diseñar» organismos especiales que eviten estas dificultades, pero no corresponden a ningún organismo conocido. Por lo tanto, el pronóstico en relación a la hipótesis panespermática clásica parece negativo.

Está la posibilidad de organismos incrustados en cometas interestelares, como ya he dicho, pero la probabilidad de un transporte de este tipo es muy pequeña, y la dosis de radiación acumulada a partir de los rayos cósmicos y de la radiactividad natural es incómodamente elevada.

LA EVOLUCIÓN DE LA INTELIGENCIA

f_i

HUBEL: Debo advertirles de entrada que quizás esta presentación no sea muy clara, por dos motivos. Uno es que llevo desfasado ocho horas y normalmente no hablo muy bien a las tres de la madrugada; el segundo motivo es que he tenido la suerte o la desgracia de tomar el desayuno con el académico Ambartsumian, quien insistió en que tomáramos un desayuno armenio completo con coñac. A ustedes les corresponderá juzgar si estos dos hechos son ventajosos o contraproducentes.

La tercera dificultad es el problema que me ocupa. En las anteriores discusiones llegamos hasta el desarrollo de la vida, y ahora se me pide que inicie una discusión sobre el sistema nervioso. Se trata de un salto muy grande porque no hemos ni siquiera empezado a discutir la evolución de una simple célula, por no hablar ya de un organismo multicelular.

El problema que queremos tratar principalmente es la dificultad o facilidad con que puede desarrollarse un animal, por ejemplo un ser humano. Debo discutir ahora brevemente todos estos problemas, desde la célula simple hasta el chimpancé y el hombre. La estrategia que me propongo seguir es decir unas cuantas palabras sobre animales muy simples y sistemas nerviosos simples, y luego pasar inmediatamente a una especie de discusión somera de un sistema nervioso complicado. Confío dedicar la mayor parte de mi tiempo a dar una impresión del aspecto que ofrece el sistema nervioso en un organismo superior.

Una cuestión que no trataré en absoluto es el problema del aprendizaje y la memoria, sobre el cual sé muy poco. De todos modos hay mucho que decir sobre ello, y todo este apartado será discutido por el profesor Stent.

Vamos, pues: el organismo más sencillo de que podemos hablar es la célula aislada que ha de luchar por sí misma y ha de resolver todos sus propios problemas. Ha de ser muy generalizada y ha de hacer muchas cosas.

De los animales unicelulares muchos son capaces de moverse. Pueden tener cilios o pelos de algún tipo para menear, y pueden moverse revolviéndose de otros modos diversos. Es evidente que también son capaces de responder al medio ambiente. Muchos tipos de animales unicelulares –probablemente todos– responden a cambios en el ambiente químico. Responden si se los pincha con una aguja, y muchos son capaces de responder, por ejemplo, a la luz.

En un estadio siguiente –los organismos multicelulares– las diversas habilidades de los animales tienden a distribuirse en unos cuantos sistemas diferentes. Por ejemplo, el organismo tendrá todo un sistema muscular dedicado al problema del movimiento, y un número de sistemas sensorios diferentes que actuarán como conductores transmitiendo información sobre el medio ambiente. Si el animal presenta alguna clase de complejidad deseará llevar a cabo algunos movimientos más bien sofisticados. Por ejemplo, incluso un gusano dispondrá de músculos circulares y de músculos longitudinales que le permitan acortarse o alargarse o girar, o incluso llevar a cabo movimientos complicados como los que se dan en la natación.

En el otro extremo, el sistema sensorio tendrá que desarrollar también prontamente grados de sofisticación para poder extraer del ambiente información pertinente a la vida del animal. por lo tanto, no ha de sorprendernos que tenga que inventarse pronto un sistema especial en la evolución que se encargue de los movimientos sofisticados, por una parte, y de extraer información del ambiente, por otra.

Finalmente hay que poner de acuerdo los varios sistemas del animal: digestivo, endocrino, etc. Son, pues, todos estos hechos los que conducen al desarrollo de algún sistema que trate la información. En los organismos multicelulares la solución en este planeta ha sido notablemente constante de un animal al siguiente. La solución principal ha sido el sistema nervioso, aunque debemos recordar que hay otros sistemas importantes, como el endocrino.

El paso siguiente consistirá, pues, en describir las propiedades de una célula nerviosa sola y pasar luego a describir algunas propiedades simples de sistemas nerviosos superiores. Permítanme, pues, que empiece presentando un ejemplo de una célula nerviosa posible, aunque la variedad de células nerviosas sea enorme. La figura 6 contiene un dibujo de una célula nerviosa más bien típica, pero quizás excepcional. Tiene muchas características de las células en general. Tiene un núcleo y una pared celular, pero el área de esta pared celular

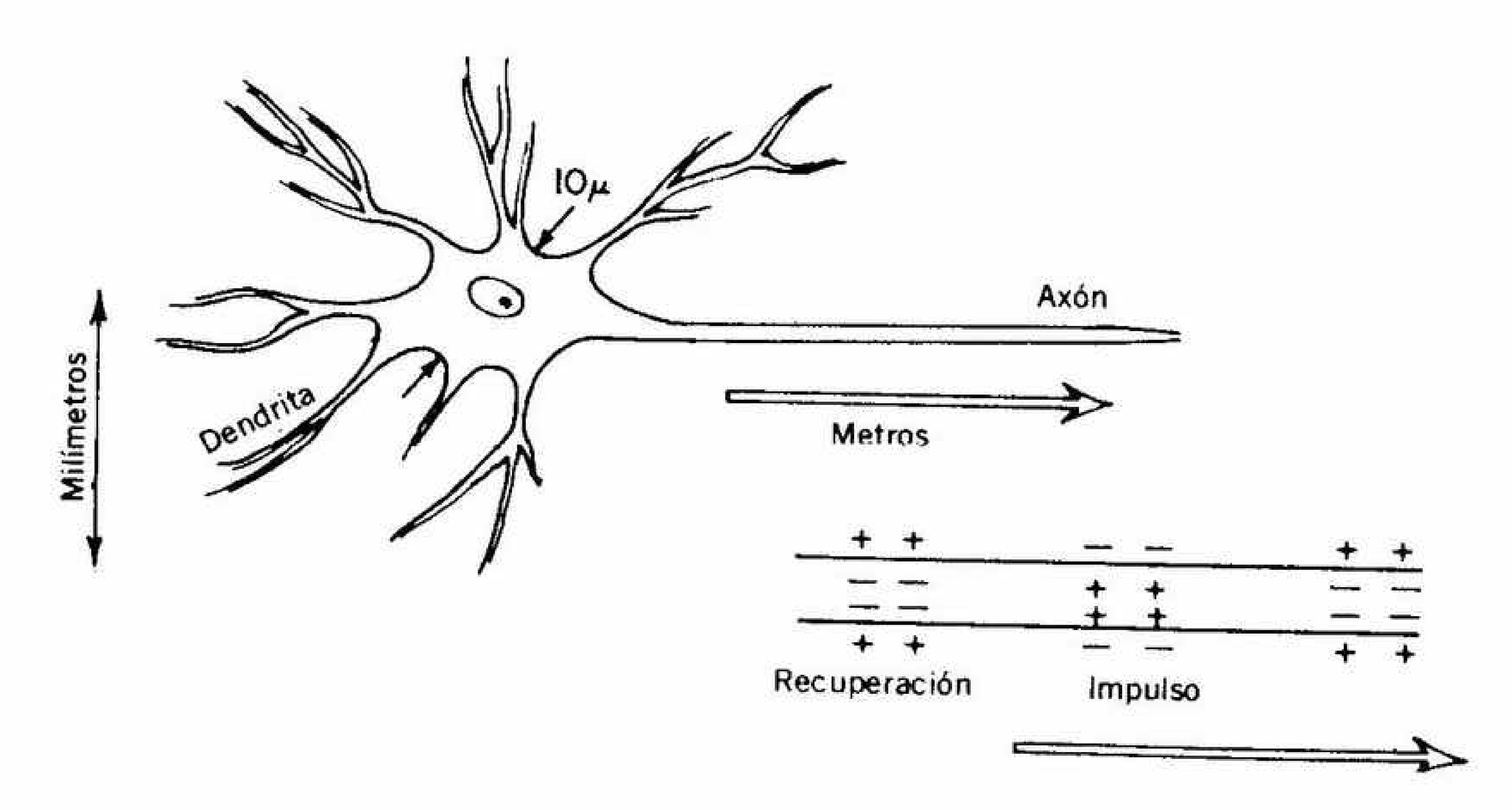


FIG. 6. Diagrama esquemático de una típica célula neurónica con indicación de sus dimensiones características. Debajo, a la derecha, hay una representación esquemática de la propagación de una onda eléctrica a lo largo de un axón.

ha aumentado enormemente en comparación con la mayoría de células nerviosas, con estructuras reales de vida y sistemas ricos en ramificaciones que si se pudiera ver toda la célula parecería como un roble o un olmo. De hecho la comparación no es desacertada, porque el número de ramas y de procesos puede ser comparable.

En el cuerpo de la célula tienen lugar muchos de los procesos que se dan en la mayoría de las demás células. Pero en general salen del cuerpo celular un número elevado de ramas y de procesos, que están dedicados normalmente a recibir información. Suelen denominarse dendritas, y las terminaciones de otras células nerviosas acaban en estrecha proximidad a las dendritas, o al cuerpo de la célula; la mayor parte de la información pasa a la dendrita o al cuerpo de la célula.

Normalmente sale del cuerpo de la célula un solo proceso, largo y delgado. Se le denomina axón. El diámetro de un cuerpo sólo será de unas 10 micras. El territorio ocupado por toda la estructura ramificada se mide en milímetros, pero el axón puede medirse o bien en micras, o bien en caso de un animal como nosotros o la jirafa puede tener una longitud de varios metros.

El axón suele dividirse en su extremo final en varias terminaciones y éstas suelen terminar sobre el cuerpo de una célula o sobre las dendritas de alguna célula nerviosa. Las conexiones se denominan sinapsis. La información llega a las terminales y la suma de toda la información que llega se integra.

Luego se envían a lo largo del axón señales simples estereotipadas.

Cuando las señales eléctricas llegan a la terminación, suele emitirse allí una substancia química. La substancia se difunde a través del espacio extracelular hasta la célula siguiente que ha de combinar esta información con la información de quizá muchos centenares más de señales entrantes. Finalmente, la decisión se expresa en forma de una señal que recorre el axón.

La señal va siempre en la misma dirección. El axón tiene una carga positiva en el exterior y una carga negativa en el interior. Durante el paso de la señal ondulatoria a lo largo del axón, esta carga se invierte. Esta onda de señal invertida desciende por el axón a una velocidad quizá de un metro por segundo. Las señales están todas determinadas por diferencias en la concentración química de iones.

Las células nerviosas pueden considerarse como células especializadas en responder a las señales químicas. La substancia química ha sido segregada, desde luego, por la célula nerviosa precedente y la respuesta de la célula nerviosa se expresa a su vez por la secreción de la substancia química.

Lo que no he dicho todavía es que según sea la substancia química, el resultado de la secreción puede ser tal que aumente la probabilidad de que se dispare la célula; pero el resultado puede ser también que la célula esté menos dispuesta a disparar. Cualquier sinapsis puede ser inhibitoria o excitadora. Lo que sea depende de la substancia segregada y de las propiedades de la membrana que recibe la señal. Se han identificado ya algunas substancias químicas y se sabe que son transmisores neurales. Por otra parte sabemos mucho menos sobre la química de toda la membrana sináptica, aunque se está investigando actualmente de modo activo. Lo que comprendemos bastante bien, gracias a la labor de Hodgkin, Huxley, Katz, Eccles y otros, son las propiedades del nervio que provocan la excitación y la inhibición, los cambios en la membrana, el proceso de transmisión del impulso a lo largo del axón.

Echemos un vistazo a la disposición entre sí de las células en un organismo típico. En la figura 7 he dibujado algunas células especializadas que podemos denominar receptores. Se parecen en muchos aspectos a las células nerviosas, pero responden a la información del medio ambiente: luz, deformación mecánica, etc. Como la mayoría de células nerviosas, tienen a menudo axones y los axones se dividen en su terminación en varias ramas. Estas ramas desembocan en otras células que aparecen aquí en forma muy simple; pueden ver, pues,

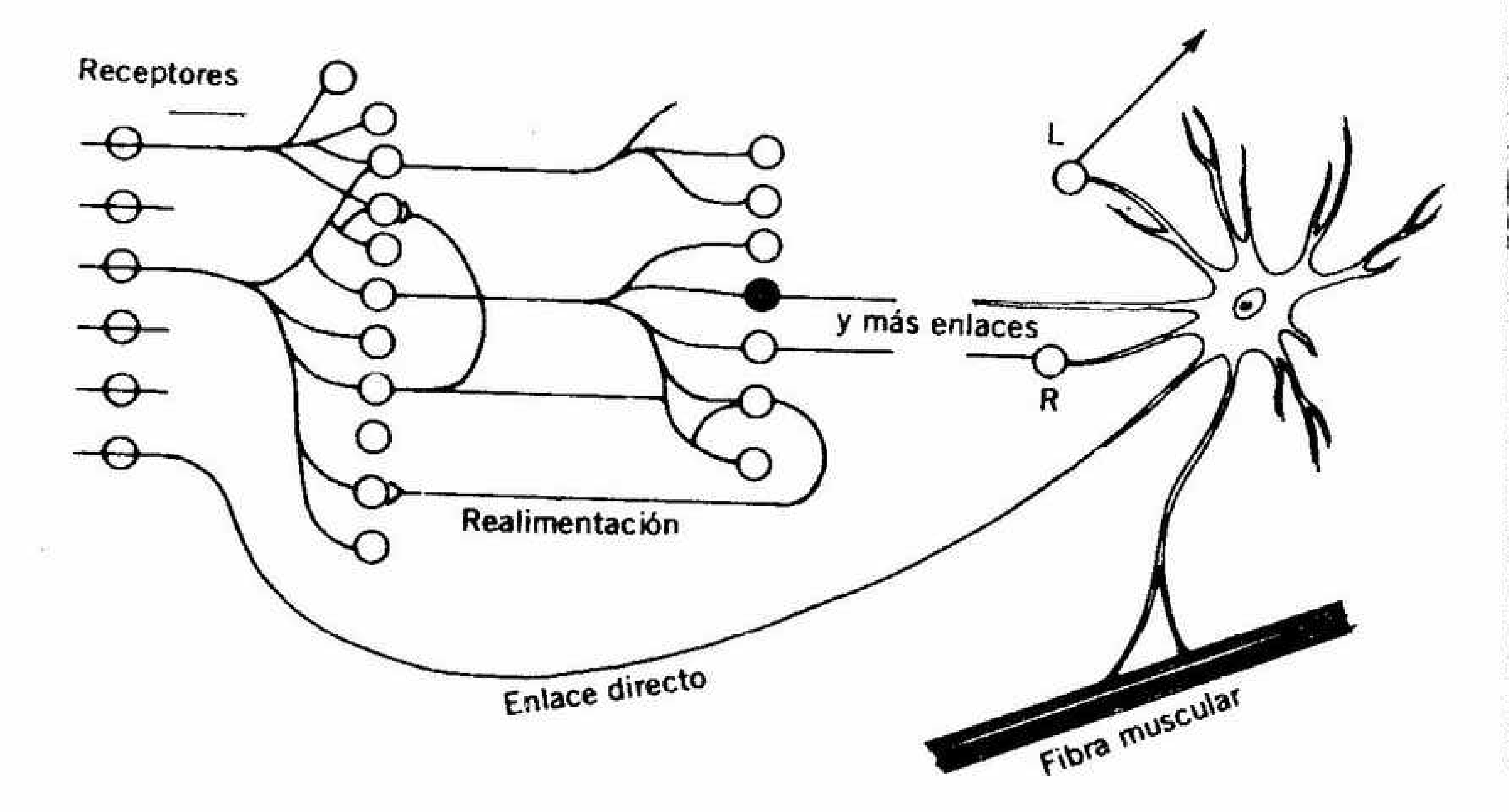


FIG. 7. Red nerviosa esquemática que conecta células receptoras (por ejemplo, en el sistema óptico del ojo) con una salida –en este caso, una fibra muscular–. Las células marcadas L y R son las encargadas de distinguir entre un movimiento en el campo visual de izquierda a derecha y un movimiento de derecha a izquierda. Véase el texto para más detalles.

a partir de este diagrama que un receptor puede influir sobre muchas células nerviosas en la etapa siguiente y una célula dada en la etapa siguiente recibe a continuación muchas señales de muchos receptores.

El mismo proceso tiende a producirse de etapa en etapa. Más pronto o más tarde se llega a la etapa final: una célula nerviosa cuyo axón acaba sobre una fibra nerviosa, y así pueden ver ustedes la señal de entrada y la de salida. Sin la señal de entrada el animal está separado de su medio ambiente y no es sino un vegetal. Sin la señal de salida no puede ejercer ninguna influencia sobre su medio ambiente y tampoco es más que un vegetal.

Tenemos, pues, aquí la parte del sistema nervioso que integra la información del medio ambiente. Cerca del final están las especializaciones para la organización del movimiento y en algún punto intermedio tenemos todo lo demás: la memoria, el alma e incluso quizá las ciencias sociales.

Sabemos bastantes cosas sobre lo que sucede cerca de la señal de entrada al sistema nervioso y en algunos animales sabemos bastantes cosas sobre lo que sucede cerca de la señal de salida. Pero sabemos relativamente poco de lo de en medio. Sin embargo, la lección que se aprende al observar las regiones cercanas a la entrada y a la salida puede ser de interés sobre lo que sucede en medio.

Deben recordar que este diagrama (figura 7) es esquemático. Hay algunas excepciones. A veces el axón puede volver hacia atrás dando realimentación, o puede seguir un curso paralelo. El circuito entre la entrada y la salida puede ser muy corto. El ejemplo más sencillo lo da la sacudida de un tendón. Un ejemplo ligeramente más complicado con unas cuantas etapas intermedias es el reflejo pupilar, cuando uno dirige una linterna al ojo y la pupila se contrae.

Permítanme que les indique ahora una reflejo posible relativamente más complicado, para que tengan una idea de lo que puede suceder a la entrada y a la salida. En la salida uno se ocupa de la organización del movimiento. Por ejemplo, si cierran el puño, es evidente que lo consiguen contrayendo muchos de los músculos de la superficie anterior del antebrazo. Lo que quizá esté menos claro es que si se limitaran a eso se produciría también una flexión de la juntura de la muñeca.

Sin ni siquiera pensarlo, cuando cierran el puño lo que hacen automáticamente es contraer otros músculos de la superficie posterior del antebrazo que ayudan, como es lógico, a mantener rígida la muñeca. Como sabe quien tiene niños, esto es algo que no se aprende, porque si acarician la palma de la mano de un niño recién nacido los dedos se cierran y se forma un bonito puño sin que se produzca una flexión de la juntura de la muñeca. La maquinaria de este movimiento la tenemos incorporada a nosotros desde el nacimiento.

Se entra en un movimiento ligeramente más complicado cuando miramos algo con los ojos. Los movimientos de cada ojo están controlados por seis músculos. Cuando miramos a la izquierda, dos músculos se contraen y sus antagonistas se relajan. Los dos músculos que se contraen no son simétricos; se trata de músculos distintos, el músculo lateral en el ojo izquierdo y el músculo medio en el ojo derecho, y esto se consigue con un grado elevado de precisión y sin que tengamos que pensarlo.

Uno puede imaginar aquí que una célula nerviosa que viene antes de la célula nerviosa final envía su señal de salida a grupos seleccionados de células nerviosas que van precisamente a los músculos correctos. Por lo tanto, una célula de este tipo puede ser importante para mover los ojos a la izquierda y una célula diferente para los movimientos del ojo hacia la derecha y otras para ir arriba o abajo, cerca o lejos. Todo esto resulta más bien obvio.

Vayamos ahora a la etapa de entrada. Recuerden que las señales de entrada a cualquiera de esas células pueden ser o bien excitadoras o bien inhibidoras. Produjo una gran sorpresa hace años cuando se pusieron por primera vez electrodos cerca de las células en el corazón de la corteza visual que se ocupa de la visión. Lo más importante que se descubrió fue que tales células, aunque el camino que conduce a los receptores de ellas sea muy claro, no daban respuesta a la estimulación cruda de los ojos. Por ejemplo, no sufrían ningún estímulo si se dirigía una linterna directamente a los ojos del animal. Es evidente en este caso que cualquier célula que reciba su señal de entrada, se verá influida por muchas células en el nivel receptor, algunas excitadoras y algunas inhibidoras, y éstas tienden a equilibrarse entre sí de modo muy preciso.

La lección global es que los niveles generales de luz no tienen mucha importancia para nosotros. Todos sabemos que lo importante en nuestra visión son las diferencias en los contornos que caen sobre nuestra retina, y en cierta medida las diferencias de longitud de onda. Por lo tanto podemos tener células para la entrada que respondan muy brillantemente y se disparen como una ametralladora con una luz verde, pero su disparo se ve detenido por una luz roja, y ante una luz amarilla o una luz blanca no responden en absoluto.

Otros tipos de células, y probablemente los tipos más comunes, responden a estímulos en alguna orientación especial en el espacio. Unas células prefieren una orientación, otras células prefieren una orientación distinta. Es evidente que para tratar todas las posibles variables, como la orientación, la longitud de onda, el movimiento, etc., se requiere una cantidad muy grande de células, pero esto no ha de preocuparnos porque precisamente lo que nuestros cerebros poseen es una cantidad muy grande de células.

Es importante comprender que no hay muchos tipos de células. Podría haber, a ojo, trescientas o cuatrocientas clases de células, del mismo modo que podemos imaginarnos trescientas o cuatrocientas clases diferentes de árboles –roble, olmo, etc.–, ninguna de ellas precisamente igual a otra, pero cualquier clase fácilmente reconocible.

Continuemos, pues, con el reflejo que estaba construyendo: podemos imaginar una célula en la cuarta o quinta etapa del interior del sistema nervioso que pueda responder cuando un punto de luz se mueve a través de la retina de la izquierda a la derecha, pero no de la derecha a la izquierda. Cualquier ingeniero eléctrico con un poco de imaginación podría diseñar

fácilmente un circuito que actuara de este modo, y algunos de los circuitos del sistema nervioso se conocen razonablemente y son más bien simples.

Si esta célula responde solamente cuando algo se mueve de la izquierda a la derecha, tenemos solamente que conectarla a la célula responsable del movimiento hacia la derecha; tendremos entonces un reflejo en el cual algo que se mueve de la izquierda a la derecha en cierta dirección a través del campo visual induce un movimiento de seguimiento en los ojos.

Me he concentrado quizás innecesariamente en algunos de estos hechos sencillos. A pesar de que las cualidades de nuestros cerebros que más nos interesan en esta conferencia se refieren al lenguaje o a la comunicación en general, o a otras funciones intelectuales, no sabemos casi nada sobre la organización neural de tales cualidades. Resulta por desgracia muy difícil realizar experimentos pertinentes en seres humanos, y quizá ni sepamos lo suficiente para plantear las preguntas adecuadas. Sin embargo, lo que puede aprenderse de estos hechos sencillos nos sugiere que en las próximas décadas probablemente podremos comprender muchas cosas más complicadas en función de los bloques constructivos simples del sistema nervioso: excitación, inhibición, el impulso nervioso y los diversos circuitos nerviosos que acabo de ilustrar, muchos de los cuales pueden observarse anatómicamente.

Si nos preguntamos qué posibles alternativas existen para tales circuitos, lo que uno imagine tendrá el mismo valor, suponiendo que sepa lo suficiente para imaginar cosas de este tipo. Me parece que una cosa que hay que adquirir es la capacidad para organizar movimientos complicados. Éste es un problema concerniente a la distribución de información a varios grupos de músculos. Por lo tanto, tenemos que disponer de muchos canales de información. Mucho antes de que se supiera nada sobre el sistema nervioso, la gente utilizaba cables para conducir la electricidad, enviaba carruajes por carreteras y llevaba a cabo otras tareas teóricas de información.

Supongo que en cierta manera podemos imaginar una colmena o una colonia de termes, donde de un modo abstracto los insectos individuales se podrían comparar a las células nerviosas individuales de nuestro sistema nervioso. Resulta realmente innecesario completar la idea. Cada cual puede ser lo abstracto que quiera.

Parece que en muchas clases de animales no ha resultado particularmente ventajoso idear un sistema nervioso que pueda superar la fase de los simples reflejos, como los que acabo de

ilustrar. Una rana responde tocando o mordiendo hacia un insecto o de hecho hacia cualquier mancha negra de tamaño apropiado, con tal que se mueva. Podemos imaginar fácilmente que las células nerviosas del sistema visual de la rana no responden a las manchas negras estacionarias, y esto es de hecho lo que encontramos.

Los insectos han tenido mucho éxito como clase y han sobrevivido muchos millones de años sin desarrollar una inteligencia suficiente para manejar radiotelescopios. En comparación con ellos, un chimpancé se aproxima quizá mucho a lo que uno quisiera conseguir. Un chimpancé puede llevar a cabo cosas muy complicadas e imaginativas, pero no tengo la menor idea de la causa que empujó a un grupo de animales a evolucionar en una dirección que conducía a una inteligencia superior mientras empujaba a otros en la dirección del insecto, que desembocaba en una especie de callejón sin salida evolutivo. Las ideas que uno oye sobre el tema no son muy satisfactorias. Se dice, por ejemplo, que el chimpancé y algunas clases de monos pronto tuvieron gran interés en balancearse de una rama a otra. Esto condujo a una gran facilidad en el movimiento con las manos y en la visión, pero impidió quizá la especialización de otros tipos, evitando de este modo los puntos sin salida de la evolución.

No pretendo tener ningún conocimiento profundo de este tipo de biología, pero creo que éstas son las direcciones en que debemos pensar cuando tratamos de imaginar los problemas que se plantean en la evolución de un sistema nervioso superior.

Es evidente que una gran diferencia entre un gusano o un insecto, y nosotros o un chimpancé, se refiere al grado de utilización por parte de estos diversos animales de lo que denominaríamos aprendizaje, y que el profesor Stent discutirá pronto.

Está finalmente el enorme problema que representa para cualquier animal dado desarrollar este sistema nervioso a partir de un único óvulo fertilizado. ¿Cómo saben todas esas fibras en qué dirección han de crecer una vez establecidas las conexiones? Este campo se está investigando muy activamente y conocemos muchos hechos aislados, pero no se sabe todavía lo suficiente sobre el desarrollo del sistema nervioso para que nos ayude en nuestras deliberaciones.

CRICK: ¿Podría darnos alguna idea sobre el número de células nerviosas, por ejemplo, en un insecto y el número de

células nerviosas en un hombre o quizás en una parte de un hombre? Me gustaría recordarle que los insectos son necesariamente pequeños por otros motivos.

HUBEL: Sí, puede hacerse muy fácilmente en órdenes de magnitud. El número de células nerviosas en un animal del tipo de un gusano se mediría supongo en millares. Una cosa muy interesante es que podemos señalar una célula individual concreta en un gusano de tierra concreto y luego identificar la misma célula, la célula correspondiente de otros gusanos de tierra de la misma especie. En el otro extremo, probablemente no se dispone de cifras muy buenas para el hombre, pero normalmente se dan unas 10^{10}. Tomemos por ejemplo el ojo humano (figura 8) y la retina. El número de células receptoras en cada retina es de 125 millones. Hay muchas células nerviosas más en la retina, probablemente varios millones más. Es curioso, sin embargo, que el número de fibras ópticas nerviosas que representan la salida de la retina sea aproximadamente de un millón.

Consideremos ahora la corteza cerebral, que es una lámina plegada de células de unos 2 milímetros de espesor (figura 8). Si consideramos la corteza como una placa (que está arrugada

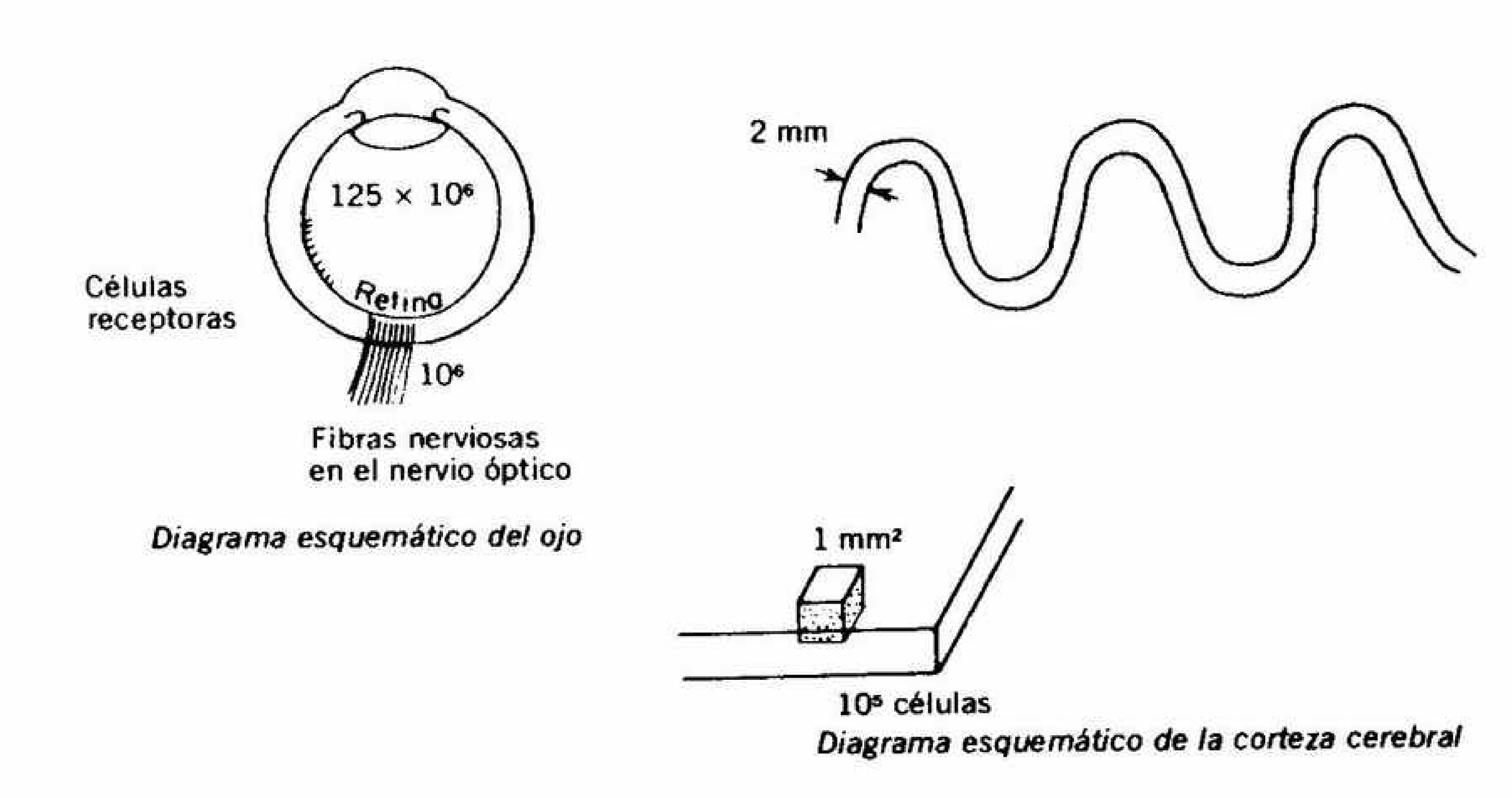


FIG. 8. Diagrama esquemático del número de células nerviosas en el ojo y en la corteza cerebral. El número de células receptoras en la retina es 125 veces superior al de las fibras que llevan información a la corteza visual desde la retina. Las células nerviosas en las circunvoluciones de la corteza cerebral están esquematizadas en la parte superior a la derecha. Cada milímetro cuadrado de superficie de la corteza cerebral, desplegado, contiene debajo 10^5 células.

para que quepa un área determinada en nuestro cráneo) y si miramos bajo un centímetro cuadrado de corteza, el número de células es de unos 10^5. El área superficial cortical de toda nuestra corteza, o por lo menos de la corteza de los canadienses, es de uno o dos pies cuadrados. Esto da un número total de células nerviosas en la corteza cerebral de aproximadamente 10^{10}.

STENT: Se me ha pedido que formule algunas observaciones sobre la evolución del sistema nervioso, pero es muy difícil decir cosas que sean de utilidad para los objetivos de esta conferencia. Sin embargo, *pueden* decirse unas cuantas cosas. Una de ellas es que las propiedades de la membrana de la célula nerviosa que permiten generar señales eléctricas son de una elevada antigüedad evolutiva y anteriores a la aparición de las células nerviosas. Por ejemplo, las encontramos ya en animales unicelulares como los protozoos. Los primeros animales multicelulares de que tenemos conocimiento, por ejemplo las medusas, poseían ya células nerviosas que tienen más o menos la forma típica de la neurona de los vertebrados descrita por el doctor Hubel. Estas células nerviosas estaban conectadas para formar el sistema nervioso más simple, denominado *red nerviosa*.

La aparición de los primeros animales de simetría bilateral, por ejemplo, los gusanos planos, representó la realización de otro avance para el sistema nervioso, a saber, el desarrollo de un *sistema nervioso central*. La red nerviosa se diferencia del sistema nervioso central en que este último tiene un grado más elevado de especialización de las células nerviosas: ciertas células nerviosas traen solamente señales del exterior y otras células nerviosas llevan solamente señales del interior al exterior.

Además, la invención del sistema nervioso central permitió la concentración de células nerviosas en la parte anterior del animal, o sea el desarrollo del cerebro. Puesto que en el curso de este desarrollo el sistema nervioso del animal y su repertorio de conducta se hacen más complejos, el número de células nerviosas aumenta continuamente desde aproximadamente 10^3 células nerviosas en un simple gusano plano hasta las 10^{10} o 10^{11} células nerviosas del hombre.

Podemos considerar ahora un tema al cual el doctor Hubel casi se ha referido, a saber, el aprendizaje. El aprendizaje es la manifestación más compleja de un atributo más general del

sistema nervioso, a saber, su plasticidad. Esta plasticidad permite que el sistema nervioso tenga una historia: es decir, que su estado actual dependa de su experiencia pasada. Es evidente que la plasticidad y en particular la capacidad para aprender le dan al sistema nervioso una gran ventaja desde un punto de vista evolutivo.

Pero quiero referirme a algo que es menos evidente, a saber, que la plasticidad no es únicamente un beneficio marginal sino un rasgo ontogenético esencial de cualquier sistema nervioso complejo. Basaré mi argumento en algunos experimentos importantes que ha llevado a cabo el mismo doctor Hubel. Contrariamente a lo que ha dicho, se trata de una de las escasas personas que saben algo sobre el aprendizaje. El único motivo de que sea yo quien presente aquí su experimento es que a él no le gusta filosofar.

Consideremos una vez más el sistema visual del gato que el doctor Hubel les ha descrito ya. Supongamos que los ojos del gato se fijan en una barra luminosa en el campo visual. La luz procedente de esta barra forma una imagen sobre las zonas correspondientes en las retinas de ambos ojos. La retina es un mosaico de células fotorreceptoras y la luz que cae sobre las células fotorreceptoras da origen a señales eléctricas. Las células fotorreceptoras están conectadas a través de muchas etapas intermedias a células nerviosas de la corteza cerebral del gato.

Cada una de estas células corticales recibe señales visuales de las retinas de *ambos* ojos. Las células fotorreceptoras retinales están conectadas a la corteza de tal manera que una célula dada de la corteza dé origen a un tren de impulsos nerviosos cuando las zonas retinales correspondientes en los dos ojos informen simultáneamente de la excitación causada por su iluminación. Por ejemplo, cuando los ojos miran una barra luminosa, una determinada célula cortical da un tren de impulsos y el gato sabe entonces que hay una barra de luz en una situación determinada de su campo visual y según una orientación determinada. Hay una cantidad muy grande de tales células binoculares en la corteza, cada una de las cuales corresponde a una orientación determinada en una posición determinada de una barra luminosa en un campo visual. Mas para que el sistema sea efectivo es necesario que los dos conjuntos convergentes de fotorreceptores que están conectados a la misma célula cortical reciban su información visual exactamente de la misma posición en el campo visual. Porque si los fotorreceptores convergentes de un ojo vieran una posi-

ción diferente de la que ven los receptores convergentes del otro ojo, el gato quedaría muy confundido.

¿Cómo puede aparecer este sistema durante el desarrollo embrionario del gato? Por una parte, y tal como ha señalado el doctor Hubel, ha de haber un proceso que conecte de modo preciso el conjunto adecuado de células fotorreceptoras a partir de partes correspondientes de las dos retinas con una determinada célula binocular de la corteza. Aunque no sabemos cómo se hace, por lo menos podemos imaginar que lo hacen los genes. Pero está el problema adicional de la óptica física del ojo, la cual se origina a su vez gracias a procesos ontogenéticos dirigidos por los genes. Esto quiere decir que las lentes de los dos ojos han de ser exactamente iguales y estar situadas con precisión de modo que la imagen de un punto dado en el campo visual caiga exactamente sobre aquellos dos puntos correspondientes de los mosaicos receptores visuales que los genes han conseguido conectar con la misma célula cortical. Sin embargo, parece casi inimaginable que los genes consigan un grado tan elevado de perfecta correspondencia en la dirección de dos procesos ontogenéticos totalmente independientes. Al dirigir las conexiones entre la retina y la corteza, los genes simplemente conectan *en exceso* el sistema. Es decir, que congénitamente cada célula cortical recibe señales de zonas retinales en los dos ojos mucho mayores de lo que resultaría compatible con la visión distinta. Este sistema basto es refinado luego por las primeras experiencias visuales del animal, mediante un proceso que define zonas retinales correspondientes de los dos ojos en aquellos puntos de los mosaicos receptores que, con las dos lentes de que dispone en aquel momento el animal, reciben luz del mismo punto en el campo visual. Es decir, que el animal *selecciona* entre el exceso de conexiones existentes precisamente aquellas que son efectivas y que transmiten de hecho a cada célula cortical binocular una señal visual coherente.

El trabajo del doctor Hubel y de su colega Wiesel ha demostrado que durante los tres primeros meses de vida del gato se da un período crítico durante el cual las conexiones de la retina a la corteza conservan un estado de plasticidad, y que sólo sobreviven el período crítico aquellas conexiones que han enviado una señal coherente a una determinada célula cortical. Este proceso puede calificarse de aprendizaje, porque la corteza cerebral del gato selecciona de una sobreabundancia de conexiones las que la experiencia le enseña que son útiles. Se conocen muchos ejemplos más de períodos plásticos críticos

en el desarrollo animal, aunque el caso de la visión binocular es el único para el cual se ha establecido hasta el momento la base neurofisiológica.

He presentado este ejemplo de modo detallado porque quería demostrar por qué la plasticidad constituye probablemente un atributo necesario de la existencia de cualquier sistema nervioso complicado. En otras palabras, el motivo de que el aprendizaje no sea únicamente un beneficio marginal adicional, evolutivamente favorable es que sin él sería imposible la misma génesis de sistemas nerviosos complejos.

Resumiendo, hay un aspecto esperanzador en la estimación del factor f_i de la ecuación (1). Hay buenos motivos para creer que si un sistema nervioso complejo llega a desarrollarse, desarrollará también la plasticidad, que es un requisito previo para el aprendizaje, a su vez necesario para la inteligencia.*

MORRISON: ¿Se sabe de algunos insectos sociales que presenten estados plásticos?

STENT: Sí, en el caso de las abejas hay una forma de aprendizaje. Una abeja exploradora puede recordar la dirección y distancia de una fuente de miel por lo menos unos minutos; regresa luego a la colmena, y ejecuta una danza para las demás abejas indicándoles las coordenadas espaciales de la fuente de miel.

SAGAN: ¿No aprenden los gusanos planos?

STENT: Éste es un tema delicado. Se trata de un aprendizaje operativo. Hay, desde luego, informes de entrenamiento con muchos invertebrados. Creo que la pregunta de Morrison no se refería a la plasticidad en general, sino al período sensitivo. De ser así no conozco ningún caso entre invertebrados. Pero no hay duda de que se puede entrenar a gusanos de tierra y a caracoles.

SAGAN: ¿Hay algún caso de entrenamiento con protozoos?

STENT: Sí, hay informes de ello. Se asegura que es posible entrenar a protozoos para que naden hacia arriba por un capilar de vidrio.

* Hay una discusión posterior relacionada con este tema que puede interesar al lector: G. HORN, S. P. R. ROSE y P. P. G. BATESON, «Experience and Plasticity in the Central Nervous System», *Science* 181, 1973, pp. 506-514. (*Nota del editor.*)

CRICK: El argumento del doctor Stent era que la plasticidad constituye una condición necesaria. No dijo que fuera una condición suficiente, y no disponemos de tiempo para discutir la complejidad de la organización nerviosa que es necesaria para formar conceptos. Además, como dijo el doctor Hubel, este tema está en una fase muy primitiva y apenas llega a dar algún resultado a los especialistas. Vemos de nuevo que se trata de un campo en el que necesitamos muchas más investigaciones para tener una comprensión adecuada. Sin embargo es un problema que guarda un tal interés para todos nosotros y para mucha gente del mundo que sería sorprendente que no se realizaran progresos importantes incluso en las partes más difíciles del tema dentro de un período de diez o veinte años.

LA EVOLUCIÓN DE LAS CIVILIZACIONES TÉCNICAS

f_c

LEE: Mi tarea consiste en llevar la discusión un paso adelante y describir las condiciones que conducen al origen de organismos inteligentes capaces en alguna época posterior de desarrollar una civilización técnica. Deseo considerar también la cuestión de la extensión con que podemos generalizar estas condiciones a formas de vida de otros sistemas planetarios. En este estudio nos vemos limitados a un caso empírico, nuestra propia especie, a la que quizás añadiríamos algunas más como los chimpancés y los delfines, que son más inteligentes que otros animales. Al principio esta escasez de material resulta desanimadora. Pero mi confianza es mayor, porque disponemos de varias poderosas herramientas de análisis que pueden hacer nuestra tarea mucho más productiva de ideas.

La primera herramienta es la teoría sintética moderna de la evolución por la selección natural.* La síntesis moderna ha dado cuenta también de la diversidad de formas de vida en este planeta, que nos ofrece un inicio de trabajo para comprender la naturaleza de las formas de vida de otros planetas.

La segunda herramienta es la teoría y el método del materialismo histórico.** Este materialismo trata de elucidar las leyes generales de la historia y de la sociedad humanas. El método iniciado por Marx y Engels intenta conseguir para la vida inteligente de este planeta lo que la síntesis de Darwin consiguió para la vida en general.

La tercera herramienta es el compromiso compartido por la mayoría de nosotros de buscar las generalizaciones más amplias y comprensivas que podamos derivar de los hechos disponibles. Creemos que en el universo actúan leyes generales y

* Véase J. HUXLEY, *Evolution: the Modern Synthesis*, Nueva York, Harper, 1942.
** Véanse K. MARX, *A Contribution to the Critique of Political Economy* (1859), Nueva York, International, 1968, y V. G. CHILDE, *Social Evolution*, Londres, Watts, 1951.

que nuestra comprensión del universo avanza a medida que reconciliamos nuevas observaciones que están en aparente desacuerdo con las leyes tal como se formulan en cada momento.

Estas tres herramientas –evolucionismo, materialismo histórico y uniformismo– ofrecen una base para utilizar nuestra experiencia a fin de comprender la inteligencia en su calidad de proceso general. Los sistemas vivientes, tanto inteligentes como no inteligentes, poseen varias propiedades que son de interés para nuestra investigación. En primer lugar, toda forma viva es adaptativa y su adaptación es consecuencia de sus respuestas a cambios en el medio ambiente a lo largo del tiempo. En segundo lugar, toda forma viva tiene una historia de cambio gradual y divergente a partir de una forma ancestral. Toda forma, por compleja que sea ahora, evoluciona de una forma más simple. En tercer lugar, una forma viva puede existir durante un período de tiempo muy largo. Y, en cuarto lugar, la evolución, si dispone de períodos de tiempo largos, constituye un medio para generar resultados altamente improbables.

Estos cuatro elementos ofrecen un punto de partida para nuestra investigación. Por ejemplo, podemos deducir que cualquier forma inteligente civilizada que encontremos en el espacio habrá evolucionado hasta ese estado a partir de una forma más sencilla no inteligente o habrá sido construida o parcialmente programada por un ser que a su vez evolucionó de una forma más simple. Discutiré más tarde esta segunda posibilidad.

Consideremos ahora la historia evolutiva de nuestra propia especie desde una forma simple a una más compleja. ¿En qué circunstancias evoluciona la inteligencia, y cómo apareció en nuestra especie? Antes de poder responder a estas preguntas, tenemos que definir qué entendemos por inteligencia. Lo mejor sería considerar la inteligencia como una adaptación. Por lo tanto discutiré la inteligencia no desde un punto de vista filosófico sino más bien como lo haría un zoólogo que al estudiar una adaptación manifestada por un organismo tiene que especificar de qué le sirve al organismo esa estructura o comportamiento. Podemos decir en esta perspectiva que la inteligencia es el medio por el cual un organismo se enfrenta con una situación compleja que hay que resolver. En resumen, la inteligencia es una adaptación para un comportamiento más complejo. La inteligencia sólo resulta adaptativa en un organismo que presenta estructuras complejas de comportamiento con

muchas posibilidades de elección. En otras palabras, no podemos imaginar un organismo que puede seguir cinco tipos distintos de acción cuando sólo le son posibles dos alternativas de comportamiento. O para decirlo de otro modo, un cerebro complejo ha de estar conectado a un sistema de comportamiento complejo.

¿En qué zonas de la vida de un organismo encontramos espacio para el desarrollo de un comportamiento complejo? Tenemos que excluir zonas como la locomoción, la obtención del alimento o la huida de enemigos. Todas estas zonas están muy bien programadas en el organismo desde las primeras fases de su vida y ofrecen poco margen para desviaciones de comportamiento. La zona principal que ofrece perspectivas para un comportamiento complejo es el campo social. Sólo aquí puede desarrollarse un comportamiento complejo sin poner en peligro las posibilidades de supervivencia del organismo. Por lo tanto, para dar con la aparición de la inteligencia debemos considerar un grupo de animales altamente social. Los primates superiores, incluyendo a monos sin cola y con cola, son mamíferos relativamente grandes y longevos, situados en puntos elevados de la cadena alimentaria, y son los animales más intensamente sociales de la naturaleza. La mayoría de ellos viven toda su vida en agrupaciones sociales fuertemente ligadas. Estos primates forman uniones firmes y duraderas con docenas de otros animales, e interaccionan con ellos hora tras hora cada día de su vida.* Es también importante para el desarrollo de la inteligencia el período prolongado de dependencia del niño primate en relación con su madre. Este íntimo ligamen ofrece la oportunidad para la transmisión de una gran cantidad de comportamiento aprendido. Usando el término del doctor Stent, disponemos de una gran prolongación del período plástico. Creo, pues, que la vida social compleja constituye un requisito previo para la evolución de la inteligencia, y este requisito tendría que ser válido para formas de vida inteligente en el universo en general.

Hay un segundo tipo de requisito fisiológico. El tamaño absoluto del animal puede resultar importante. Los monos listos con visión estereoscópica y coordinación mano-ojo han existido por lo menos desde hace 25 millones de años. Sin embargo, a pesar de su ingenio resultaban demasiado pequeños. Pesaban unos pocos kilos y sus cerebros tenían un volu-

* Véanse I. DEVORE, ed., *Primate Behavior*, Nueva York, Holt, Rinehart, 1965, y A. JOLLY, *The Evolution of Primate Behavior*, Nueva York, Macmillan, 1972.

men inferior a los 100 centímetros cúbicos. Puesto que el tamaño absoluto del cerebro es importante para el número de rutas neurales, la aparición real de la inteligencia humana sólo pudo haber sido posible cuando nuestros antepasados alcanzaron un tamaño mayor de unos 30 kilos para el peso del cuerpo con una capacidad craneal mínima de 400 centímetros cúbicos.

Además el animal tenía que disponer de un suministro sanguíneo adecuado al cerebro (esto elimina a la jirafa) y como factor más importante el cerebro tenía que estar situado de modo que su expansión no interfiriera con el funcionamiento continuado de otros sistemas, como la obtención de alimento. Las cajas craneales de la mayoría de los mamíferos están fuertemente apretadas por pesados músculos mandibulares y por el aparato olfatorio. Por lo tanto, el logro temprano de la posición erecta puede haber liberado el cerebro para su posterior desarrollo.*

Éstos son los requisitos previos, sociales y fisiológicos; son pocos. Me parece que otros factores no juegan un papel necesario en la aparición concreta de la inteligencia.

Parece ser que este proceso se produjo en algún momento hace 4×10^6 años en una especie ahora extinguida de primates antropoides de la familia Homínidos que recibe la denominación corriente de *Australopithecus*.

El momento de la aparición del hombre ha ido avanzando continuamente hacia el pasado. Hasta hace poco se creía que la aparición de las primeras herramientas se produjo hace un millón de años. Luego, en 1959, el malogrado Louis Leakey descubrió el *Zinjanthropus* en la garganta de Olduvai, en la República de Tanzania. La técnica del potasio-argón lo fechó en $1,75 \times 10^6$ millones de años. En 1969, en la zona del lago Rudolf Richard, Leakey descubrió restos de homínido y herramientas de piedra asociados incuestionablemente con un depósito fechado en $2,61 \times 10^6$ millones de años.** Se han encontrado restos de homínidos sin herramientas de piedra en los cauces del Omo en Etiopía y se han fechado en $3,75 \times 10^6$ años.

Este ser, conocido también como el grácil *Australopithecus*, nos es conocido por los restos de más de un centenar de individuos en una docena de localidades diferentes de África. Eran pequeños, de unos 150 centímetros de alto y pesaban entre 30 y 40 kilos. Su postura era erecta, aunque puede

* Véase B. CAMPBELL, *Human Evolution*, Chicago, Aldine, 1965.

** R. E. F. LEAKEY, «Fauna and Artifacts from a new Plio-Pleistocene Locality near Lake Rudolf in Kenya», *Nature* 223, 1970, pp. 223-224.

decirse que podían correr mejor que andar. Sus manos eran como las nuestras, capaces de coger objetos con precisión, y construían herramientas. Pero es muy curioso que su cerebro fuera muy pequeño en comparación con el cerebro humano. La capacidad craneal se ha medido entre 450 y 650 centímetros cúbicos. Este tamaño cae dentro del intervalo que presentan los grandes monos vivientes.

Este ser es el mejor candidato que tenemos como antepasado del género *Homo*, del cual somos los únicos representantes vivos. Por lo tanto, para buscar las causas de la emergencia de vida inteligente en este planeta tenemos que estudiar el comportamiento y la adaptación de los gráciles australopitécidos.

¿Cuál fue la causa? Voy a presentar tres explicaciones conexas que son corrientes en la antropología norteamericana y británica, en especial las extraídas del trabajo del profesor Sherwood L. Washburn de la Universidad de California y de sus alumnos, entre los cuales me cuento. La primera se refiere a la construcción de herramientas; la segunda, a la transición a la caza como modo de producción, y la tercera, a la emergencia del lenguaje.

La importancia de las herramientas en la evolución humana es conocida desde hace mucho tiempo.* Las herramientas fueron las primeras formas de energía extrasomática dominada por el hombre. En efecto, la invención de herramientas desplazó el foco de las fuerzas adaptativas del morro (el rostro, los dientes y las mandíbulas) a las manos y el cerebro.

Sabemos que el hombre no es el único constructor de herramientas entre los primates superiores. Jane van Lawick-Goodall, al estudiar a los chimpancés en la naturaleza, ha descubierto que los chimpancés fabrican regularmente varios tipos de herramientas. Éstas incluyen un palo para sondear montículos de termes y una esponja para sacar agua potable de lugares inaccesibles. Por lo tanto, la designación del hombre como *el* animal constructor de herramientas ya no es válida.** Sin embargo, la herramienta le permitió al hombre explotar con éxito un nuevo nicho ecológico y eso tuvo consecuencias decisivas para la historia humana. En un momento temprano del pleistoceno inferior, el hombre cambió su modo de subsis-

* Véanse F. ENGELS, *The Part Played by Labour in the Transition from Ape to Man* (1896), Moscú, Progress Publishers, 1968, y S. L. WASHBURN, «Tools and Human Evolution», *Scientific American* 203, 1960, 1264-1266.

** Véase J. VAN LAWICK-GOODALL, «Tool-using and Aimed Throwing in a Community of Free-living Chimpanzees», *Nature* 201, 1964, pp. 1264-1266.

tencia herbívoro por otro omnívoro con la caza como factor importante. La caza de grandes mamíferos exige un nivel de cooperación social y de coordinación de movimientos que no tiene precedentes ni siquiera dentro de los primates sociales.

Según esta opinión, el hombre primitivo llenó un nicho ecológico en África dispuesto para un gran mamífero omnívoro que viviera en las llanuras abiertas y no en el bosque. Esta adaptación combinó la solidaridad social y la protección mutua de que disfrutaba el grupo primate con el gran territorio, el tamaño y la dieta de alta calidad de los grandes carnívoros como leones, hienas, perros salvajes y lobos.

Sin embargo, para poder llenar este nicho el hombre primitivo tuvo que desarrollar métodos de comunicación a un nivel mucho más elevado que antes. No sólo tenían los cazadores que hacerse señales entre sí durante la caza, estaba también la cuestión de la distribución de la carne a los miembros no cazadores del grupo social: las hembras (que proporcionaban los alimentos vegetales, igualmente importantes), los jóvenes, los viejos y los enfermos, que se quedaban atrás. Fue, en efecto, la nueva división del trabajo social junto con el nuevo modo de subsistencia lo que generó la evolución de la inteligencia. Llegamos aquí al fondo de la cuestión: *La inteligencia humana reducida a lo esencial es sinónima de lenguaje humano.* Inteligencia es comunicación mejorada, una transmisión de información más compleja de un individuo a otro.

En una primera fase el lenguaje pudo evolucionar de las llamadas que intercambiaban los cazadores en la caza, pero en la segunda fase el lenguaje se convirtió en un recurso para mediar las relaciones sociales dentro del grupo. Este sistema de señales más elaborado tuvo un efecto realimentador con el sistema social. Fue posible entonces una vida social mucho más compleja y eso aumentó el valor adaptativo de un animal con habilidad social, además de buen cazador.

El etólogo británico Michael Chance ha dicho que la *equilibración,* es decir, la capacidad de aplazar una acción hasta una ocasión más propicia, tuvo una tremenda ventaja selectiva en la evolución del hombre.* Es la capacidad de pensar una cosa y hacer otra, o de pensar antes de actuar, una capacidad que sería igualmente adaptativa para mujeres y hombres, a diferencia de la «habilidad cazadora» que sólo parecería selectiva para los machos. Quizá nuestros colegas de neurofisiología podrían dar más explicaciones sobre la separación en los circuitos cerebrales entre pensamiento y acción. No es posible decir en qué punto de la primitiva evolución de la inteligencia aparece la conciencia, es decir, la noción de uno mismo. El fallecido Irving Hallowell y otros antes que él han afirmado que la conciencia representa la aurora auténtica de la humanidad, pero el modo de situar este acontecimiento en el registro fósil constituye un problema extraordinariamente difícil.*

Una cosa está clara: una vez que el lenguaje queda establecido, posee su propia lógica de desarrollo. De hecho el lenguaje se elabora mucho más allá de las necesidades adaptativas de los organismos que lo poseen.

Este problema me ha preocupado. Los bosquimanos Kung del sur de África, con los cuales viví varios años, muestran una inteligencia totalmente comparable a la nuestra. Y, sin embargo, ellos viven con una cultura material total que comprende menos de cien objetos con nombre. Por otra parte, sus capacidades comunicativas son realmente impresionantes. Se sientan por la noche alrededor del fuego de campamento y cuentan historias que están llenas de complejas metáforas, de humor, de alusiones y de todos los modos de expresión que solemos asociar con la literatura de una civilización avanzada; y, sin embargo, se trata de personas que no practican la agricultura ni tienen otro animal domesticado que el perro.

¿Tenemos que deducir de esto que el crecimiento tremendo de la inteligencia humana estaba destinado principalmente a objetivos sociales y de recreo? La evolución del lenguaje y su relación con la adaptación de los primitivos homínidos es algo poco comprendido todavía. Queda todavía mucho trabajo que hacer en este terreno. Lo único que podemos decir en este momento es que el lenguaje pudo aparecer para que el hombre fuera un cazador más perfecto, pero que las consecuencias imprevistas de este acontecimiento fueron muy grandes. La inteligencia del hombre no sólo condujo eventualmente a la destrucción del modo de vida cazador que quería perfeccionar, sino que actualmente hace correr el peligro de destrucción a la misma especie.

Sin embargo, mientras duró la adaptación a la caza y a la recolección fue de un éxito extraordinario. El hombre ha vivido como cazador el 99 por ciento de su historia. El hombre en

* M. R. A. CHANCE y A. P. MEAD, «Social Behavior and Primate Evolution», *Symposia of the Society for Experimental Biology* 7, 1953, 395-439.

* A. I. HALLOWELL, «Self, Society and Culture in Phylogenetic Perspective», en la obra editada bajo la dirección de Sol Tax *The Evolution of Man*, Chicago, University of Chicago Press, 1960.

su calidad de cazador experimentó una radiación explosiva que, hacia el año 10000 a. de C., le había hecho ocupar todos los rincones del globo habitable, y, contrariamente a la opinión corriente, la población humana no se mantuvo estacionaria en el período pleistocénico. Se cree actualmente que la población humana aumentó cien veces durante el pleistoceno, sin que superase la capacidad de mantenimiento de una superficie determinada.

Heredamos varias cosas de los cazadores: primero, un medio ambiente libre de polución; en segundo lugar, un sistema social igualitario; en tercer lugar, una buena vida familiar; en cuarto, un físico robusto; quinto, el gusto por el bistec. Actualmente nos enfrentamos con una crisis ecológica y también con la amenaza de aniquilación nuclear; por lo tanto, el modo de vida cazador quizá vuelva a demostrar que es nuestra adaptación más estable y favorable.*

¿Cómo pasamos de este agradable estado a los apuros actuales? El cambio se relaciona con los hechos que sucedieron a fines del pleistoceno, hace 10000 años, con el origen de la agricultura y la aparición de ciudades, estados, imperios y la civilización técnica, y éste es el momento adecuado para que pase mi turno a mi colega el doctor Flannery.

FLANNERY: Mi tarea consiste ahora en explicar de qué modo el hombre cayó de este jardín edénico que ha descrito el doctor Lee hasta su actual y desastrosa situación. No puedo estimar exactamente cuál es la probabilidad del origen de la civilización, porque no sabemos cuántas culturas prehistóricas *no* se convirtieron en civilizaciones. Pero mi impresión subjetiva es que las posibilidades han de ser bastante buenas, porque las civilizaciones aparecieron independientemente en muchas partes diferentes del mundo en épocas prehistóricas; en Mesopotamia, India, China, Egipto, México y Perú. Todavía no sabemos hasta qué punto todos los casos fueron independientes. Sabemos que de hecho Mesopotamia, India y Egipto estuvieron estrechamente relacionados, pero fueron ciertamente independientes de México y Perú, donde aparecieron civilizaciones con un conjunto completamente diferente de productos agrícolas, razas y lenguajes.

A pesar de la aparición frecuente de las civilizaciones en épocas prehistóricas, la civilización es un acontecimiento muy tardío en la historia humana. Si pudiéramos comprimir toda la

* R. B. LEE e I. DEVORE, *Man the Hunter*, Chicago, Aldine, 1968.

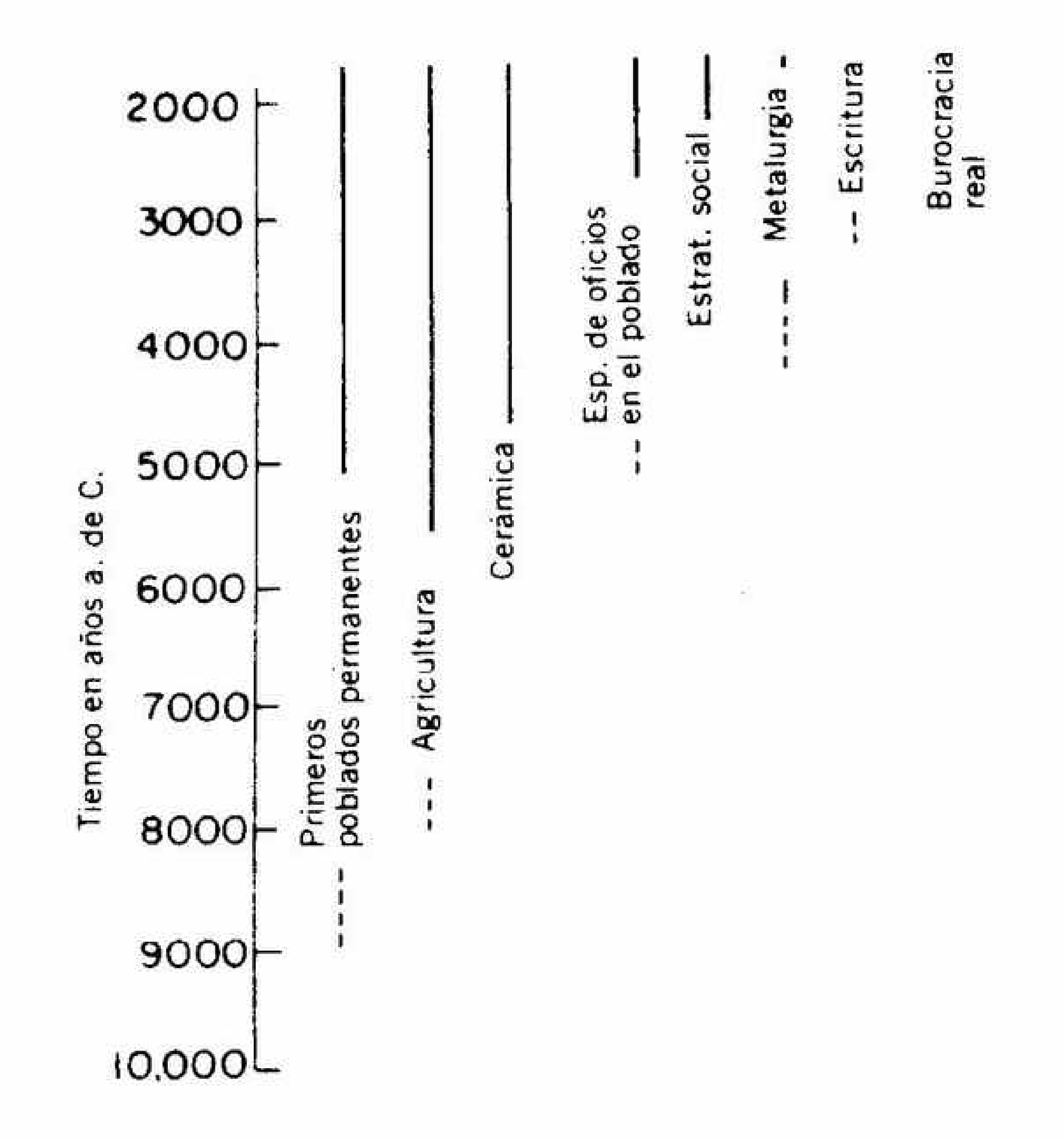


FIG. 9. Representación del desarrollo de la civilización en el próximo Oriente antiguo. Ha habido series semejantes en otras partes, pero con escalas temporales absolutas diferentes.

vida del hombre sobre la Tierra en un período de 24 horas, la civilización ha existido únicamente en el último minuto de ese día. La figura 9 contiene la escala temporal del desarrollo de la civilización en Mesopotamia, como ejemplo. Se inició hacia el 10000 a. de C. Las fechas de la tabla valen sólo para Mesopotamia porque los tiempos son diferentes para otras civilizaciones.

Si empezamos en el 10000 a. de C., cerca del final del pleistoceno, los primeros poblados permanentes aparecieron en el Próximo Oriente hacia el 8000 o 9000 a. de C., antes del inicio de la agricultura. La agricultura había empezado hacia el 7500 a. de C. La fabricación de cerámicas había empezado hacia el 6000 a. de C., la especialización de los poblados con oficios hacia el 5000 a. de C. La estratificación social siguió muy de cerca a esta especialización, la metalurgia se desarrolló entre el 3000 y el 4000 a. de C., y la escritura y la civilización burocrática habían aparecido en el Próximo Oriente hacia el 3500 a. de C. La longitud total del período referido fue de unos 7 000 años.

Es evidente que las civilizaciones, una vez hecha su aparición, tuvieron ventajas selectivas, porque continuaron expansionándose y substituyendo otras formas de vida, proceso que está todavía en curso. Del mismo modo que la vida primitiva que apareció sobre la Tierra consumió las moléculas orgánicas a partir de las cuales se desarrollaba, las primitivas civilizaciones se expansionaron, consumiendo los productos de su medio ambiente hasta que hubieron destruido totalmente las condiciones ambientales dentro de las cuales hicieron su aparición primeramente.

Probablemente las tres cuestiones más importantes para los objetivos de este simposio son:

¿Por qué las civilizaciones no aparecieron más pronto en la historia humana?

¿Por qué aparecieron en las partes del mundo donde concretamente aparecieron?

¿Cómo avanzaron y siguiendo qué fases?

El concepto del paso de la humanidad a través de los estadios de la caza primitiva a la agricultura primitiva y al desarrollo de una sociedad estratificada es un tema que ha sido considerado por los filósofos sociales desde hace un siglo. En este mismo período se ha reconstruido teóricamente una secuencia de hechos por parte de los filósofos sociales, entre ellos V. Gordon Childe, Lewis Henry Morgan, Friedrich Engels, Julian Steward, Leslie White y, más recientemente, Elman Service y Marshall Sahlins.

Pero estas reconstrucciones no se han formado a partir de los datos de la prehistoria, sino estudiando los pueblos del mundo actual que todavía viven del modo que imaginamos debían haber vivido nuestros antepasados prehistóricos. En años recientes, una de las tareas de la arqueología ha consistido en poner a prueba esta reconstrucción sobre los datos reales de la prehistoria y generar y comprobar nuevas hipótesis sobre las reglas del desarrollo de las sociedades prehistóricas.

¿Qué tenían en común todas las civilizaciones prehistóricas o antiguas? En primer lugar, producían su propio alimento mediante la agricultura. Tenían todas ellas una sociedad jerárquica con una clase dirigente profesional. Presentaban todas ellas una densidad de población muy alta en comparación con el hombre del pleistoceno. La mayoría tenían ciudades o centros urbanos y artes, oficios y arquitectura sostenidas por el Estado, y casi todas tenían sistemas de escritura de diversos tipos, aunque variaban mucho de una región a otra. Parece que

los sistemas de escritura han sido uno de los últimos elementos en desarrollarse.

Pero hubo cosas que estas civilizaciones no compartieron. No todas tenían una tecnología altamente desarrollada. La civilización maya de Mesoamérica, por ejemplo, incluso en su cenit, no tenía la rueda, ni animales de tiro, ni herramientas metálicas, y en la mayoría de los casos sus formas de agricultura eran relativamente simples. Sin embargo, tenía la organización sociopolítica altamente desarrollada de otras civilizaciones primitivas. Tenía astrónomos excelentes, y el calendario maya era más preciso que el de los españoles que conquistaron a los mayas en el siglo XVI.

Permítanme ahora que les ofrezca una de las hipótesis en curso sobre el modo en que el hombre inició la agricultura en el Próximo Oriente, donde quizá por primera vez en el mundo el hombre había empezado a cultivar la tierra. Todos los pueblos cazadores y recolectores, como ha dicho ya el doctor Lee, tienden a mantener sus poblaciones por debajo del nivel en el cual agotarían sus recursos naturales. Uno de los mecanismos para conseguirlo es la emigración a nuevas zonas a medida que la población crece. Los datos arqueológicos nos demuestran que las poblaciones crecieron y que a todo lo largo del pleistoceno tuvieron lugar emigraciones, pero hacia el 10000 a. de C. todos los ambientes del mundo, excepto las partes extremas del Ártico y la Antártida, estaban ya ocupados. Es decir que las poblaciones continuaban creciendo, pero no quedaba terreno libre a donde emigrar. Al mismo tiempo los niveles marítimos de todo el mundo subieron a medida que los glaciares de fines del pleistoceno se iban fundiendo, y eso convirtió muchos sistemas fluviales inferiores o costeros en estuarios sometidos a las mareas. Estos sistemas de estuarios costeros eran muy ricos en pescado, moluscos y recursos alimentarios marítimos: alimentos invertebrados.

Hacia fines del pleistoceno empezamos a observar las primeras ocupaciones permanentes en la costa de gente que utilizaba los recursos marinos con mucha mayor intensidad de lo que nadie había hecho antes. En las zonas del interior observamos un gran aumento en la variedad de alimentos que el hombre consumía y que pueden encontrarse en las estaciones arqueológicas. En otras palabras, a medida que el mundo empezaba a colmarse, el hombre, que antes había sido primariamente cazador, se pasó paulatinamente a los alimentos vegetales, invertebrados y marinos. Muchos de esos alimentos podían ser recogidos por mujeres y niños y muchos eran

suficientemente abundantes en bastante número de localidades de modo que la gente podía vivir de forma permanente en el mismo lugar todo el año.

Esto no resolvió los problemas de la presión de población a medida que la población continuaba creciendo, especialmente en las zonas donde se encuentran las primeras comunidades sedentarias. Durante este período, en todo el mundo, observamos una gran variedad de experimentos con sistemas destinados a aumentar el suministro local de alimentos. Entre ellos está la elaboración de tecnologías para hacer comestibles algunos tipos de plantas que hasta entonces no habían sido comestibles, y la conversión a tipos de alimentos que antes habían sido ignorados.

Uno de los experimentos realizados en el Próximo Oriente fue el establecimiento permanente en zonas donde crecían de modo natural trigo y cebada. En algunas partes del Líbano, Siria y Jordania, el trigo y la cebada silvestres dan un rendimiento en condiciones naturales de 500 kilos por hectárea. Esto significa que en tres semanas de recolección una familia de cuatro personas podía recoger el suministro alimentario de trigo y cebada para un año, y hacia el 8500 a. de C. había poblados permanentes en esta parte del mundo con instalaciones de almacenamiento bien desarrolladas. En los restos arqueológicos de algunas de estas estaciones se encuentran semillas carbonizadas de trigo y cebada silvestres.

Una teoría actual afirma que la agricultura empezó poco tiempo después en zonas más secas alrededor de los márgenes de estos hábitats favorables, en zonas donde sólo se podía elevar la productividad hasta los 500 kilos por hectárea plantando deliberadamente los granos. Hacia el 7000 a. de C. encontramos ya los primeros granos de cereales carbonizados que presentan cambios genéticos en relación a la forma silvestre. Esto se acompaña por una tecnología en desarrollo de las instalaciones de almacenamiento, con cuchillos de sílex para recolectar el grano, hornos para tostarlo y utensilios de moler en piedra, para trillar.

Durante este período, y en un espacio de tiempo relativamente corto, el poblado se convirtió en la forma dominante de asentamiento en la mayor parte del Próximo Oriente. Los primeros poblados, por lo que nos dicen los datos arqueológicos, se componían de casas ocupadas por familias nucleares, en las cuales la familia era la unidad básica de producción y almacenamiento y en las que los antepasados eran enterrados bajo los suelos de las casas; en muchos casos se conservaban

los cráneos. Esto sugiere ahora, en contraste con la mayoría de cazadores del período precedente, la existencia de una forma de organización social que cruzaba muchas líneas generacionales, y en la cual se consideraba que los antepasados muertos continuaban tomando parte en las actividades de la comunidad.

Los lugares de enterramiento indican que las familias habían aumentado de tamaño y que probablemente en esta nueva sociedad agrícola había una selección en favor de un número mayor de hijos que antes. Porque en una sociedad agrícola hay muchas más tareas realizables por los niños (los cuales constituyen realmente una carga en las sociedades cazadoras).

En esta etapa cada cual era su propio artesano; es decir, que cada familia era capaz de ejecutar las actividades manuales que necesitaba para ser autosuficiente. Pero hacia el 4500 a. de C. empezamos a observar las primeras muestras de poblados especializados en actividades manuales.

Les voy a presentar un solo ejemplo de la vecina Turquía. En este período y cerca del lago Van de Turquía hay por lo menos un poblado prehistórico localizado en una fuente de obsidiana o vidrio volcánico, utilizado para fabricar y exportar cuchillos u hojas.

Durante el período entre 7000 y 3000 a. de C. las poblaciones de algunas partes del Próximo Oriente aumentaron sesenta veces. Los pueblos crecieron y aparecieron en ellos edificios públicos. Se puede distinguir en los enterramientos una élite hereditaria enterrada con materiales en bruto exóticos importados de zonas muy distantes.

A medida que la población aumentaba, la agricultura se intensificó hasta incluir sistemas de riego: algunos poblados en buenas localidades agrícolas tenían muros o fosos defensivos.

Hacia el 3500 a. de C., la competición para obtener los recursos estratégicos escasos se había hecho tan intensa que se observa una diferencia completa en el asentamiento. En algunas zonas el número real de poblados se reduce mucho y la población parece haberse concentrado en una ciudad. En aquella época los artesanos fueron trasladados desde los poblados locales a distritos o barrios de la ciudad. A veces las mismas ciudades están espaciadas tan regularmente, a distancias normales una de otra, que parecen formar estructuras hexagonales que los geógrafos denominan retículas de localización central; es decir, que la ciudad se había convertido en un centro de servicios para una zona muy grande de asentamientos rurales y había asumido todas las funciones administrativas

y de oficios que hasta entonces se encontraban en los poblados. En el curso del desarrollo de los templos en el centro de algunas ciudades, puede verse por primera vez la aparición de pequeñas residencias, que son evidentemente las de los encargados del templo, y según el arqueólogo Robert Adams fueron estas pequeñas residencias las que en un espacio de 500 años se convirtieron en los palacios de los gobernantes de la ciudad.

En este punto aparece la primera escritura; los primeros escritos en Mesopotamia parecen consistir en cuentas de productos agrícolas y de animales entrantes y salientes. Dicho con otras palabras, en esta época había que procesar para la sociedad una cantidad tan enorme de información que existía una clase profesional de escribas, y se había desarrollado un sistema de almacenamiento de la información en tablillas de barro.

Si podemos considerar a estas sociedades antiguas como poblaciones que intercambiaban materia, energía e información con su medio ambiente, parece evidente que las instituciones posteriores que se desarrollaron y que caracterizaron a las civilizaciones, servían casi siempre para procesar información de diversos tipos. Estas instituciones se fundaron inicialmente para servir al sistema con mayor rapidez, pero, como sucede a menudo, una vez fundadas las instituciones pasaron a servirse a sí mismas, de modo que continuaron expandiéndose y planteando exigencias al sistema para su propio mantenimiento.

En esta época hemos alcanzado las civilizaciones burocráticas del 2500 a. de C., muchas de cuyas características no son muy diferentes de nuestras civilizaciones actuales: no solamente tenían un sistema de leyes y de precedentes y registraban las actividades legales sobre tablillas de barro, sino que incluso podemos leer en las tablillas quejas contra los abogados, porque tomaban el dinero de la gente y no hacían nada.

Ésta es la secuencia básica revelada por los datos arqueológicos. Si tuviera que escoger tres cuestiones que contestar en el futuro, serían éstas probablemente las más importantes:

En primer lugar, ¿por qué algunas personas en el mundo empezaron a producir su propio alimento mediante la agricultura mientras que otras personas encontraban sistemas distintos para resolver los problemas de la densidad de población? ¿Tuvo algo que ver con la plasticidad genética de las mismas plantas de la región? ¿Qué relación tuvo con la organización social y la división del trabajo? ¿Fue un esfuerzo para minimizar las diferencias entre años lluviosos y años secos, o fue el resultado de un sistema de recolección intensa de plantas silvestres?

Segundo: ¿cómo aparecieron las sociedades estratificadas? ¿Fue invistiendo de poder a un dirigente para protegerse; o revistiéndole de poder por su papel como especialista religioso; o estuvo relacionado con una competición más intensa tras unos recursos cada vez más escasos?

Tercero: ¿cómo apareció la tecnología mantenida por el Estado? Este punto nos interesa especialmente, porque fue el predecesor de la investigación aplicada con fines tecnológicos. ¿Fue para resolver el problema de aumentar el suministro de alimentos, o para desarrollar las armas y protegerse contra grupos competitivos? ¿Fue para producir objetos de lujo para la nobleza, o para el comercio o para los dioses, o por todos estos motivos y otros más?

CRICK: Creo que sería útil que reformuláramos el problema que nos ocupa. El problema que tenemos consiste en estimar la probabilidad de vida inteligente en otros mundos, y en especial la distancia de la civilización más próxima.

Hay un problema que deberíamos también considerar: si la vida empezara por segunda vez en la Tierra, ¿cuánto tardaría en evolucionar hasta dar seres con nuestra inteligencia?

La formulación que escribió sobre la pizarra el profesor Sagan (ecuación 1) es una formulación de estado estacionario. El segundo problema que estoy considerando, el subproblema, puede tratarse mejor expresándolo como un proceso acelerado. Estimamos los tiempos más probables para cada uno de los diferentes pasos que tienen que darse sucesivamente y que aparecieron en la ecuación (1). En esta formulación los sumamos todos como tiempos probables.

Me parece desde este punto de vista (y a eso es a lo que voy) que hay una gran diferencia entre la presentación que nos hizo el doctor Flannery y la del doctor Lee. Porque si uno cualquiera de los pasos precisa un tiempo relativamente corto y tenemos pruebas de que tuvo lugar independientemente en varios lugares, nuestra estimación del tiempo medio transcurrido será corta. Aunque nuestras estimaciones de tiempo para el tema de la charla del doctor Flannery contengan un error con un factor de 100 –en otras palabras, si el proceso tardó cien veces más de lo que dice–, el retraso no nos preocuparía mucho.

En cambio, cuando llegamos al tema de la alocución del doctor Lee, estamos considerando un tiempo que va desde los organismos más simples al hombre, y ese tiempo es muy largo.

Por lo tanto, si cometemos un error en su estimación, podríamos alcanzar fácilmente cifras superiores a la edad del universo.

Por consiguiente, aunque considero apasionantes ambas presentaciones, deduzco que la discusión debería concentrarse más en la disertación del doctor Lee que en la del doctor Flannery, y me gustaría formular algunas observaciones preliminares sobre las palabras del doctor Lee.

Me propongo omitir cierto problema técnico. Este problema se refiere a cómo pasamos en la evolución de los microorganismos a los llamados eucariotas: los organismos superiores más sencillos, por ejemplo, la levadura. Propongo omitirlo y pasar al período desde la levadura al hombre.

Creo que podemos suponer lo siguiente: que una vez se dispone de organismos unicelulares con el aparato molecular que encontramos en la levadura, ha de darse necesariamente una evolución hacia organismos con muchas células y hacia diferentes organismos con grados cada vez mayores de complejidad a medida que transcurre el tiempo. Sin embargo, eso no nos da una población infinita o muy grande de organismos diferentes, por el siguiente motivo: si consideramos los insectos, por ejemplo, están en cierta manera atrapados en un callejón sin salida evolutivo, aunque se trata de animales de gran éxito: porque no pueden evolucionar hacia tamaños muy grandes debido a las exigencias fisiológicas relacionadas con su suministro de oxígeno, y de hecho no hay insecto que haya crecido mucho más que una cucaracha. Por lo tanto, tenemos que considerar clases grandes de animales y no simplemente cierto número de especies.

La disertación del doctor Lee me ha dado una fuerte impresión de que para que la inteligencia evolucione, tuvo que satisfacerse un número bastante grande de criterios de tipos diferentes. Parto del supuesto, que creo comparte el profesor Minsky, de que, para poder ser inteligentes y formar conceptos, tenemos que disponer de un número razonablemente grande de elementos constitutivos del sistema nervioso, en este caso un gran número de células nerviosas. Parece existir un límite para el grado de miniaturización realizable: segun parece, una célula nerviosa no puede ser demasiado pequeña. Por lo tanto, hay que tener una masa cerebral mínima para ser inteligente.

Esto explicaría muy fácilmente que los insectos hayan sido incapaces de resolver problemas matemáticos, aunque tengan una vida social, algunos de ellos se ocupen de sus crías, etc.

Pero creo que son demasiado pequeños para las matemáticas, y por eso el insecto no nos resulta interesante.

En cambio, cuando pasamos a los reptiles vemos que éstos son muy grandes y variados. Cuando aparecieron, tuvieron mucho éxito. Sus cerebros no eran especialmente grandes, pero no sabemos ninguna razón que les impidiera ser mayores.

Por otra parte, la mayoría de los reptiles, por ejemplo, no cuidan de sus pequeños, debido al modo que tienen de desarrollarse, y por eso y posiblemente por otras razones podemos ver que tampoco los reptiles están capacitados para las matemáticas.

Los pájaros, que desde el punto de vista zoológico son unos seres muy inteligentes, tienen que tener necesariamente, porque han de volar, cerebros pequeños.

Hay unos cuantos ejemplos más. En el caso del calamar gigante, que es ciertamente muy grande, creo que por lo menos los más pequeños van en bancos y, por lo tanto, se comunican entre sí. Tienen brazos con los que pueden manipular cosas. Tenemos que preguntarnos qué no podrían hacer; y también me gustaría que pensaran ustedes en los lobos, que cazan y van en jaurías. No disponen de manos, y así sucesivamente.

No quiero profundizar este argumento. El argumento es que se necesitarían muchas, muchas propiedades diferentes, para poder formar un animal inteligente.

El segundo punto que deseo abordar en este contexto es el siguiente: ¿sucedió sólo una vez? Estamos, por consiguiente, en la misma situación lógica que teníamos antes, cuando expresé mi idea sobre el juego de cartas: que no se puede estimar el tiempo medio de algo que sucede a partir de un acontecimiento único, a no ser que se disponga de algún conocimiento previo.

Por lo tanto, llego a la conclusión de que al haber durado este proceso en todo caso mucho tiempo, nos es muy difícil obtener una estimación del tiempo que se tardaría en la Tierra para pasar de nuevo por todo el proceso y llegar a la aparición por segunda vez de la inteligencia.

Entonces –y ahora lo reitero–, lo que dijo el doctor Flannery no es problema para nosotros, pero lo que dijo el doctor Lee constituye un problema porque no podemos utilizar una estimación de tiempo a partir de un solo caso, y todavía no tenemos una comprensión lo bastante profunda del proceso para poder obtener, ni en este caso, una estimación razonable del tiempo medio del origen de la inteligencia.

LEE: Las proporciones relativas de tiempo desde el origen de la vida hasta el origen de la inteligencia, por una parte, y desde el origen de la inteligencia hasta el origen de la civilización, por otra, son en cada caso de un 99,9 por ciento: de 4000 millones de años a 4 millones de años, y de 4 millones de años a, digamos, 10 millares de años.

Por lo tanto, en la perspectiva del origen de la vida, el origen de la inteligencia no se ha retrasado más de lo que ha hecho la civilización en la perspectiva del origen de la inteligencia.

CRICK: Creo que mi observación se refería a los tiempos absolutos, no a las razones de tiempos.

LEE: En cuanto a toda esta cuestión de si podría suceder por segunda vez, dada la gran diversidad de especies y las decenas de millares de nichos ecológicos que han sido ocupados por formas vivas en este planeta, tengo la impresión subjetiva, pero fuerte, de la inevitabilidad de la adaptación para la inteligencia. Al final lo conseguirá alguna forma viva, dada la naturaleza experimental y exploradora de las adaptaciones en este planeta.

GOLD: Me gustaría referirme a otra posible fuerza impulsora para el desarrollo de la inteligencia, que no se ha mencionado, aunque recibió una mención periférica; se trata de la posibilidad muy interesante de que existiera otra forma humanoide que no se mezclara, que no pudiese mezclarse con nuestros antepasados, pero que coexistiera con ellos durante quizá hasta dos millones de años. Si esta historia es correcta, y parece que hay algunas pruebas fuertes en su favor, debemos pensar que la humanidad vivió durante este período tan prolongado en una feroz competición con otra raza que ciertamente se interesó por las mismas zonas de terreno y las mismas circunstancias, y que probablemente cazó los mismos animales, etc., y que por lo tanto sería permanentemente una seria competidora.

De ser esto cierto, me parece que la raza que quizá fuera físicamente inferior, como parece que lo fueron nuestros antepasados, se habría visto diezmada en su intento de superar en inteligencia continuamente a la raza competidora, y si ésta existió durante casi dos millones de años, habría constituido un factor selectivo muy importante en el impulso hacia una inteligencia superior. Quizás una competición tan feroz es de

hecho una cosa necesaria para crear nuestro nivel de inteligencia.

MORRISON: Uno ha de estar de acuerdo en que un acontecimiento no puede constituir una estadística, especialmente cuando el doctor Crick basa su argumento en unos terrenos más bien agnósticos. Es muy difícil ganarle la partida.

Es también correcto que la suma repetida de las escalas temporales significa que el intervalo mayor que vemos, que son los quizá 4 000 millones de años entre la primera célula sin orgánulos y nosotros, es el más serio con relación al error. Pero creo que hay dos puntos sobre la segunda llegada a los cuales me gustaría referirme. Uno está implicado ya en cierta medida por la propuesta de Gold, por lo menos como una proposición muy general: resulta muy difícil llenar dos veces un nicho en presencia de una especie existente, por lo tanto no ha de sorprendernos si en el espacio de fases de las especies alrededor de la inteligencia queda un gran intervalo, porque la presencia de una de ellas repelerá a las demás de alrededor, por motivos obvios.

Esto es cierto en cada nivel del proceso evolutivo; por lo tanto, me gustaría preguntar cuál es la incidencia de formas no próximas en su plasticidad al origen de la inteligencia, como lo eran los primates del doctor Lee hace cinco millones de años. ¿Cuál era la incidencia de otras formas de mamíferos (quizá sólo hay una entre unas cuantas clases, pero aún así se trata de una estadística bastante buena), formas que se parecían a nuestros antepasados, no en los inicios del pleistoceno sino en el eoceno, cincuenta millones o cien millones de años antes, cuando supongo que había (no soy primatólogo) pequeños individuos lemurianos que colgaban de las ramas, pesaban una libra y, sin embargo, tenían el potencial de la inteligencia?

Si miro entre las familias de mamíferos, creo que hay unas cuantas que me parecen favorables, si nosotros no estuviésemos aquí y dispusieran de un tiempo tan largo como el que va del lémur al hombre. Cito como ejemplo al mapache, omnívoro, que usa sus manos y es muy inteligente.

MINSKY: Me gustaría seguir la línea de Morrison. Hay varios candidatos: la ballena, el delfín, los cefalópodos. No sé lo viejos que son en su forma actual, pero por lo menos disponen de protocerebros bastante bien desarrollados. Como ha dicho el doctor Crick, algunos pájaros son bastante listos. Pero si la situación ecológica cambiara y pudiesen volver a la tierra y no

tuvieran que volar, como el avestruz..., bueno, en tierra hay bastantes apreturas y los pájaros se han pasado su historia volando.

Me gustaría, pues, considerar el concepto de que existe un nicho ecológico para la inteligencia. No sé si nadie lo ha propuesto realmente, pero me parece que esté donde uno esté, si uno puede permitirse el peso y el metabolismo extras, la inteligencia será un bien para él. Pero me ha gustado mucho el argumento de Lee sobre el peligro de tener una inteligencia pequeña. La inteligencia es experimental. Para sobrevivir en un ambiente donde uno no es muy listo hay que confiar en un instinto puesto a prueba de modo profundo y cuidadoso. Uno no puede empezar con experimentos. Como sucede con las mutaciones, los experimentos intelectuales casi siempre resultan fatales; tenemos, pues, el argumento de Lee de que en un ambiente social los niños pueden intentar experimentos, y, lo que en mi opinión es más importante todavía, se les pueden explicar.

Por eso me ha sorprendido una de las últimas observaciones del doctor Lee. Parecía preocuparle la idea de por qué las civilizaciones no tecnológicas, una vez desarrollado el lenguaje, continuaban explicándose historias y desarrollando una superior cultura intelectual, no tecnológica. En mi opinión se trata de una cuestión técnica. Cuando uno ha desarrollado el lenguaje en la teoría de la confrontación, consigue lo que se denomina capacidad universal de cómputo. Y resulta muy difícil, de hecho resulta imposible, construir una computadora que pueda efectuar cualquier cálculo no trivial y al mismo tiempo que sea incapaz de efectuar todos los cálculos no triviales. Se trata de una curiosa cuestión técnica, basta con disponer de suficiente memoria. Por lo tanto, me parece que una vez desarrollado el lenguaje uno de los precios es que hay que desarrollar el humor y todos los demás juegos sociales para pasar el rato, y es precisa una civilización altamente desarrollada y además con un conjunto muy estricto de reglas morales para impedir que efectúe la solución de problemas no triviales.

MUKHIN: El doctor Lee definió la inteligencia como un medio que tiene el organismo de enfrentarse con situaciones complicadas, e incluyó también en ello a la vida social. Por otra parte, el profesor Crick ha dicho que la inteligencia se caracteriza por el peso del sistema computador. Me parece que deberíamos introducir algunos factores de corrección y

que deberíamos calificarlos. De hecho sabemos que una gran cantidad de organismos pueden enfrentarse con situaciones complicadas y tienen un modo de existencia parecido a la vida social. Resultaría difícil imaginar a alguno de los presentes afirmando que los insectos poseen inteligencia.

Al mismo tiempo conocemos sistemas cerebrales que son mayores que los nuestros –por ejemplo, las ballenas– y nos resulta difícil estimar su grado de inteligencia, aunque no hay duda que se trata de animales inteligentes. Me parece, pues, que al examinar todas estas posibilidades es muy importante seguir definiciones estrictas, aunque no sea eso lo que ahora más nos interesa. Por lo tanto, la pregunta que formulo al doctor Lee se refiere a una definición más exacta de inteligencia y de situaciones sociales complicadas.

LEE: Trataré de responder brevemente a esto. Un ejemplo típico de una situación complicada con la que puede enfrentarse un primate implica a unos animales viviendo en grupo y dispuestos en jerarquías dominantes; el animal 3 tiene por encima a los animales 1 y 2 y a los animales 4 y 5 por debajo. La hembra está en celo y le gustaría aparejarse con ella, y él tiene que elaborar la mejor estrategia para conseguir aliarse contra los 1, 2, 4 y 5 y abrirse paso estratégicamente hasta su objetivo deseado, a saber, copular con la hembra.

Estas jerarquías dominantes son complejas, no lineales, implican coaliciones e implican a muchas especies de primates, cambios de conducta muy complejos, de minuto en minuto y de segundo en segundo, lo cual considero una lectura muy interesante para el desarrollo de una conducta compleja.

E. MARKARIAN: Me gustaría decir unas cuantas palabras sobre las observaciones del doctor Lee. He escuchado con mucho interés y estoy de acuerdo con gran parte de lo dicho. Estoy de acuerdo concretamente en que el concepto de adaptación es un concepto clave para comprender la civilización y su génesis.

Me gustaría, sin embargo, formular dos comentarios críticos en este contexto.

En primer lugar, los problemas de la génesis de la sociedad humana tendrían que discutirse en este simposio desde un punto de vista muy definido que pudiese dirigir la atención a la construcción de un modelo genético abstracto de civilización. Este modelo genético de civilización ha de abarcar también sus posibles manifestaciones extraterrestres.

En segundo lugar, para que el concepto de «adaptación» pueda cumplir con su importante función metodológica dentro del contexto teórico dado, es necesario en primer lugar que determinemos los aspectos específicos de la sociedad humana como sistema adaptativo.

Las síntesis teóricas de conceptos e ideas fundamentales nacen a menudo de una interpretación nueva y ampliada de conceptos anteriores desarrollados en campos del saber más estrechos. Por ejemplo, el concepto de información y de control nació en las ciencias sociales, y sólo después, con la emergencia de la teoría de la información y de la cibernética, trascendió de aquellos límites y adquirió los nuevos significados que tiene actualmente en estos campos.

Parece también posible el proceso inverso cuando los conceptos nacidos en las ciencias naturales pueden adquirir un significado mucho más extenso en el suelo fértil de las ciencias sociales: por ejemplo, el concepto de adaptación.

Esta cuestión es relevante. Sin embargo, el referir la sociedad humana a los sistemas adaptativos permitiría examinar la sociedad humana en una perspectiva más amplia con otros sistemas autorreguladores, y probablemente el escenario más complicado en este caso tendría que ser el problema de establecer los rasgos específicos de la sociedad humana como un sistema de adaptación. Esto nos conduce al tema de saber mediante qué generalización sociológica podemos formular la conducta adaptativa de una sociedad humana.

Creo que la sociedad humana puede referirse a una clase especial de sistemas que denominaremos adaptativos-adaptadores. Esta definición tiene el propósito de expresar el carácter específicamente activo y transformador de la actividad humana en su relación con la naturaleza.

Los elementos específicos en el comportamiento de la sociedad humana consisten en una adaptación general al ambiente mediante una contraadaptación del ambiente a la sociedad humana para satisfacer sus necesidades a través de una influencia resuelta. En otras palabras, un sistema adaptativo-adaptador es un término que refleja dos aspectos del comportamiento de la sociedad humana, que es tanto adaptativa como adaptadora.

Este aspecto de la sociedad humana quizá pueda extrapolarse a las sociedades extraterrestres.

Es cierto que el elemento de actividad «adaptadora» es típico también de algunos animales. Sin embargo, la actividad adaptadora de los animales está en primer lugar programada

genéticamente y estrictamente especializada; en segundo lugar, y con raras excepciones, no implica una tecnología.

Es el concepto de «cultura» («civilización») lo que en la ciencia moderna expresa de modo integrador el sistema de medios y de mecanismos que permite la posibilidad de elaborar un tipo de actividad «adaptativa-adaptadora» universal, programada no genéticamente.

Desde este punto de vista, la esencia cósmica de la cultura tendría que considerarse como una capacidad de seres vivientes unidos en algunas colectividades estables para crear un sistema de medios y de mecanismos potencialmente no precondicionados por el tipo de organización biológica. Se debe a estos medios y mecanismos derivados extrabiológicamente que la actividad de los miembros del sistema sociocultural se vea estimulada, programada, coordinada, satisfecha y asistida.

En esta perspectiva teórica se ha de considerar a la civilización como un medio específico de «ordenamiento negentrópico» de la materia. Es muy posible que esta comprensión del fenómeno de civilización pueda convertirse en una base teórica para su definición funcional.*

El carácter transformador, adaptativo-adaptador de la actividad de un sistema al iniciar el camino de la civilización plantea un problema práctico muy importante, un problema que se refiere a la relación entre entropía y negentropía en la interacción de estos elementos.

Como ya saben, los efectos de negentropía desarrollados por las civilizaciones y otros sistemas autorreguladores pueden presentar solamente un carácter local, y el descenso de la entropía en un sistema social se produce mediante un aumento de estas tendencias en el ambiente. Pregunto, pues, cuáles son los límites impuestos al proceso. Este problema se planteará obligatoriamente a toda civilización altamente desarrollada, porque una consecuencia natural del progreso rápido de una civilización es el aumento de los procesos entrópicos en el ambiente. Por lo tanto, el problema del potencial adaptativo de la humanidad es un problema social de singular importancia.

Para concluir, me gustaría preguntar lo siguiente al doctor Lee: quisiera saber su opinión sobre cuáles son los canales y medios principales por los cuales los animales acumulan la

* El autor analiza de modo detallado estos problemas en las obras siguientes: *Los problemas del estudio sistemático de la sociedad*, Moscú, Zhnany, 1972; *Sobre el origen de la actividad y de la cultura humanas*, Ereván, Editorial de la Academia armenia de Ciencias, 1973.

experiencia adquirida en su vida y la transforman en una experiencia colectiva.

LEE: El motivo de que no utilizara la palabra «cultura» en mi presentación es que la cultura, en el sentido de un repertorio de comportamientos transmitido no genéticamente capaz de acumularse a través de la tradición, se observa tanto en los primates no humanos como en los primates humanos. Existe cierta capacidad para la acumulación del comportamiento aprendido en micos y monos, y creo que sin pruebas en la herencia de caracteres adquiridos, a que antes nos referíamos. Esto no representa una diferencia cualitativa entre el hombre y el animal, sino únicamente cuantitativa.

DISCUSIÓN

ORGEL: Me gustaría volver a un tema anterior y presentar un argumento que confío demostrará lo poco acertado que es realizar predicciones cuando falta todo tipo de información previa.

Consideremos que han ocurrido realmente algunos acontecimientos en la Tierra. Preguntemos cuál es la probabilidad de que ese acontecimiento, B, ocurra en un planeta semejante a la Tierra. Si falta información sobre los antecedentes, la naturaleza del acontecimiento B es de hecho totalmente irrelevante, porque lo único que nos proporciona es información sobre los antecedentes.

Me gustaría ahora considerar tres acontecimientos: primero, el desarrollo de una atmósfera en este planeta; segundo, el desarrollo de la vida en este planeta, y tercero, una discusión habida entre el doctor Crick y el doctor Sagan en este planeta. Al faltar la información sobre los antecedentes nos vemos obligados a admitir que estos tres acontecimientos una vez predichos tendrán igual probabilidad en el planeta. Creo que cualquier teoría que haga predicciones de este tipo no es una teoría sobre la cual deseemos basar una acción.

SAGAN: Estoy totalmente de acuerdo. Pero *tenemos* información sobre los antecedentes. Si el planeta tiene una masa suficientemente grande y en la exosfera una temperatura no excesivamente elevada, probablemente tendrá una atmósfera. Pero la probabilidad *a priori* de que tenga lugar una conversación entre el doctor Crick y yo –y mucho menos de que no estemos de acuerdo– es minúscula.

MCNEILL: Me parece que en su fórmula maestra, la ecuación (1) con f_1, f_i y f_c, al elegir estas fases críticas, la cosa resulta

algo arbitraria. Estaba pensando de qué modo llegó usted a este número y a la frecuencia posible de civilizaciones cósmicas mediante un proceso de multiplicación de negativos. El número de estadios que decidió situar entre la creación de la Tierra, la condensación del sistema solar y el logro de la civilización contemporánea es realmente arbitrario. Tiene usted tres *f*, pero podría igualmente tener cinco o seis. Por ejemplo podría distinguir dividiendo entre planta y animal, y entonces tendría otros filtros con otros grados de probabilidad.

SAGAN: O la evolución de los eucariotas a partir de los procariotas.

CRICK: Creo que la evolución está subdividida en estadios, y, para identificar los estadios de tiempo corto, disponemos de una estimación razonable de lo que representan; pero no tenemos estimación sobre los estadios prolongados, porque son los difíciles. Podría afirmarse, por ejemplo, que una vez que los mamíferos empezaron a desarrollarse, para llegar a algo parecido al hombre tardarían quizás el orden de tiempo que observamos, más o menos un factor no demasiado grande, en cuyo caso, si pudiéramos sostener este punto de vista, no deberíamos preocuparnos mucho de esta fase.

Quisiera decir que uno de los motivos de esta reunión consiste en identificar cuáles son los estadios en relación a los cuales somos realmente ignorantes y que podemos dar de lado. Estaría de acuerdo con su análisis.

MCNEILL: Pero esto queda sesgado por el número de *f* que decida introducir. ¿No es cierto?

CRICK: Sí.

SAGAN: No si cada *f* vale uno. Entonces se pueden introducir las *f* que se quiera.

CRICK: Si esta formulación es correcta, al dividir la *f* en dos partes se tendrá simplemente el producto de esas dos *f*.

Quiero decir también que usted desea establecer una incertidumbre sobre el valor de *f*, y quiere dividir las *f* de modo basto entre unas de las que esté razonablemente seguro (y de las que no tendría que preocuparse) y otras sobre las cuales existe realmente una incertidumbre, entre las cuales yo pondría el origen de la vida.

MINSKY: Mi pregunta no se refería a la respuesta de esta cuestión concreta: cuál es el nexo más débil. Pregunto cuál se supone que sería nuestra recomendación en dos casos posibles. Primero, si *N* –ecuación (1)– es bajo, creo que si nos ponemos a escuchar tendremos que escuchar una gran cantidad de estrellas; pero si podemos convencernos de que *N* es muy alto, podemos montar 20 antenas, escuchar las 20 estrellas más próximas y estar bastante seguros de que tendremos éxito con una de ellas. Por lo tanto la cuestión es, en un extremo, cuántas antenas erigir, y en el otro, si resulta que existe precisamente un nexo muy débil, como el desarrollo de la mitosis o lo que sea, la posibilidad de recomendar que se realicen más investigaciones sobre esta faceta particular de la bioquímica. Sin embargo, nos dedicamos preferentemente a lo que creemos muy importante y poco comprendido.

CRICK: En cuanto al tema de la búsqueda, que probablemente deberíamos aplazar hasta después, creo que tenemos que adoptar el punto de vista de una historia muy conocida que me explicó por primera vez Tommy Gold en Cavendish, hará de eso veinte años: la historia del hombre que buscaba una llave que acababa de perder. Uno pierde algo en la calle y hay poca luz. No mira en los puntos oscuros, mira en los iluminados, porque es lo único que puede hacer de momento.

La analogía es muy precisa en nuestro caso, y la luz es el alcance razonable que puede tener nuestra búsqueda. Y me parece que habrá que llegar necesariamente a esa conclusión: que hay que mirar en las zonas iluminadas porque uno no puede definir con ninguna probabilidad la cantidad de luz y de tinieblas.

SAGAN: Pero uno puede tener diferentes estrategias por diferentes contingencias. Se puede seguir una estrategia, y buscar solamente civilizaciones próximas e irrelevantes, o se puede seguir la estrategia de buscar civilizaciones lejanas y avanzadas –las civilizaciones de Kardashev de los tipos II y III–, y eso exige una estrategia investigadora muy diferente.

CRICK: No quería decir que hubiese solamente una estrategia. Estoy totalmente de acuerdo con usted; lo que iba a decir es que un análisis adecuado (que no he pensado a fondo) afecta al costo probable y a su rendimiento. Por eso necesitamos los valores de *f*. Pero de hecho ésta es la parte difícil del problema; no resuelve el problema, pero quizá lo plantea de un modo gráfico.

SAGAN: Después de todo, habrá un número muy grande de probabilidades y pudiéramos identificarlas todas. Uno puede imaginar una ecuación con un centenar de *f*.

MCNEILL: Por lo menos.

SAGAN: O con un millar de *f*. Y entonces uno puede adoptar un punto de vista optimista y decir: voy a dar simplemente una probabilidad del 90 por ciento a cada uno de esos factores. Y cuando uno acabe de multiplicar el 0,9 por sí mismo un millar de veces, le quedará sin duda un número muy pequeño.

MCNEILL: Por esto me preocupa la omisión de esas *f*. Uno no puede decir realmente que una *f* tenga una probabilidad de unidad, creo que no se puede.

SAGAN: Desde luego que se puede.

MCNEILL: Tiene que conseguir una probabilidad inferior a uno para todos estos factores.

SAGAN: No estoy de acuerdo. No hay duda de que hay una gran cantidad de pasos individualmente improbables que conducen al desarrollo de nuestra civilización técnica. Pero ¿no existen también otras secuencias de pasos que conducirían a una civilización más o menos equivalente? ¿Existe algún tipo de teorema cuasi ergódico en la evolución de civilizaciones de modo que siempre se acabe, por un camino u otro, en esta zona particular del desarrollo intelectual? Si esto es así, podría ser perfectamente aceptable que muchas de las *f* valieran uno. Es en este punto donde algunos de nosotros discrepamos de George Gaylord Simpson, que ha resumido amablemente sus opiniones en el Apéndice B.

SHKLOVSKY: ¿Podría el doctor McNeill repetir su problema?

MCNEILL: En la ecuación (1) hay tres *f*. Creo que esta elección de tres es muy arbitraria. Si se añaden más, por ejemplo un paso entre la vida vegetal y la vida animal como una *f* separada, o el paso entre el desarrollo de seres humanos inteligentes de los cazadores a los productores de alimentos, y luego de los productores de alimentos a las civilizaciones que conocemos actualmente, y después una civilización que disponga, por ejemplo, de una religión superior como un elemento

estabilizador de su estructura social, y luego una civilización que desarrolle la tecnología como hizo el mundo occidental en el siglo XVII, etc., se podría conseguir un número de pasos intermedios, cada uno de ellos con una probabilidad inferior a 1.

Ésta es la cuestión que planteo. Si se introducen más *f*, la probabilidad comienza a disminuir y va disminuyendo cada vez más. El contraargumento, por lo que he entendido, es que puede haber caminos alternativos que conduzcan a un resultado comparable.

GOLD: Si no existieran podríamos decir que la búsqueda de inteligencia extraterrestre es totalmente desesperada.

SAGAN: Si no hubiese muchos caminos hacia un resultado funcionalmente equivalente, la *N* de la ecuación (1) valdría la unidad.

ORGEL: Consideremos en plan de analogía la posibilidad de ir desde Cambridge a Ereván. Podríamos decidir que se trata de algo muy difícil, que la probabilidad es de 10^{-4}. Sin embargo, uno podría contestar: ¿Por qué dar un salto tan grande? ¿No sería mejor dividirlo en tres pasos: de Cambridge a Londres, de Londres a Moscú y de Moscú a Ereván? Diríamos entonces que intervienen tres factores y que la probabilidad será menor. Pero el argumento no es válido porque cuando uno estudia por separado estos tres factores descubre que hay una posibilidad algo mayor de ir de Cambridge a Londres que ir de Cambridge a Moscú, y si uno multiplica entre sí estos tres factores se llega exactamente al mismo resultado.

No obstante, supongamos ahora que hay también una ruta a Ereván que va de Cambridge a Londres y a Budapest hasta Ereván. En este caso la probabilidad neta de llegar a Ereván es mayor y hay que añadir las probabilidades de las rutas alternativas. Modificaría los resultados, pero tampoco cambiaría mucho los números considerar sólo dos rutas en lugar de una.

Creo que lo que Carl y otros intentan es hacerse una idea de la probabilidad total desde Cambridge a Ereván: aseguran (y no veo que puedan hacerlo) que son capaces de justificarlo dividiéndolo en unas cuantas piezas separadas. ¿Te he captado, Carl?

SAGAN: Perfectamente. Luego, las rutas alternativas son importantes. Si alguien consiguiera con gran dificultad realizar el

vuelo de Budapest a Ereván, podría deducir que resulta casi imposible alcanzar Ereván. Pero la ruta por Moscú hace mucho más probable la llegada a Ereván.

ORGEL: Por eso no cambia nada la cantidad de f que tengamos.

MINSKY: Si uno da muchos pasos, el producto final resulta el mismo: la probabilidad de hacer exactamente al hombre es muy pequeña. Pero no hay solamente una ruta para llegar a un equivalente humano.

PLATT: Quiero afirmar que hay algunos pasos cuya probabilidad es muy próxima a la unidad. A algunos de esos pasos los llamo cerrojos, porque se tiene un ciclo de acontecimientos que se automantiene. Hay algunos pasos en evolución donde al superar cierto umbral se puede estar seguro de caer por la pendiente y no importa en absoluto el camino concreto que se siga; de todos modos uno llega al fondo de la pendiente.

El habla constituye probablemente, en mi opinión, un caso de este tipo. Una vez pasado el umbral del habla, uno genera el lenguaje, que, como dice Minsky, es una computadora universal y puede llegar a hacerlo todo, incluyendo la creación del humor, del mito, de los cuentos, etc. A partir de este punto el camino conduce con relativa certeza a la tecnología superior.

CRICK: Esto es lo que yo intentaba explicar antes. Creo que por eso es útil pensar la otra formulación en términos temporales. Tomemos el caso concreto de f_c. La impresión que saqué oyendo al doctor Flannery es que si se llega a este estadio concreto, el tiempo necesario para formar una civilización es relativamente corto.

Por lo tanto, si uno comete un error al estimar un paso de una escala temporal breve –esto es en esencia lo dicho por el doctor Platt: dijo que al final se llega, no dijo el tiempo necesario–, no importa si uno se equivoca por un factor de 10, porque tenemos factores de 10. Son éstos los pasos en los que deberíamos ponernos de acuerdo para darles de lado. Me parece, igualmente, que si se llega al estadio en el que la gente hace matemáticas, que por cierto es uno de los criterios que utilizo para la inteligencia (es un criterio arbitrario pero útil), se ha de llegar necesariamente a la alta tecnología; y puesto que el tiempo es muy breve, no importa si en otras partes se tardó algo más.

Por lo tanto, lo que importa son los pasos en los cuales un error de estimación desemboca en una gran diferencia para el tiempo real total. Me parece, pues, que uno de los objetivos de esta reunión es identificar cuáles son los subpasos –y estoy totalmente de acuerdo con lo dicho antes de que hay muchos más– que podemos ignorar porque en esta terminología la probabilidad resultará 1. Si deseamos tratar el problema en esta dirección y no desde el punto de vista de la persona que se limita a buscar donde hay luz, tendremos que ocuparnos de los pasos que precisaron más tiempo. En relación a estos pasos hay dudas reales (porque se trata de acontecimientos únicos) sobre el carácter típico de nuestro tiempo. En mi opinión el origen de la vida es uno de esos pasos, pero no sé lo bastante sobre el curso total de la evolución posterior para poder dividirlo en subpasos y decir, en la expresión de Simpson, cuáles están conformes y cuáles no.

Una vez llegamos a los mamíferos no importa si doblamos el tiempo. No afecta al cálculo, ¿por qué ha de preocuparnos?

SAGAN: Déjenme explicar cuál es el punto de vista de Simpson. Tiene un artículo titulado *La no prevalencia de los humanoides*. (Véase apéndice B). El principal argumento de este artículo es que hay un número grande de pasos individualmente improbables requeridos para la evolución del hombre, y que la posibilidad de recurrir al azar de esta secuencia de pasos es tan pequeña que, por así decirlo, haría imposible la existencia de la humanidad.

PLATT: Está hablando del hombre y no de la inteligencia.

SAGAN: Y esto es precisamente lo que constituye la crítica de la opinión de Simpson: que hay muchas, muchas rutas más hacia un organismo que sea funcionalmente equivalente a un ser humano, pero que no se parezca en nada a un ser humano. Simpson, por otra parte, cree que los pasos realmente difíciles en el origen del hombre ocurrieron tarde, en el mesozoico y en épocas más recientes.

GOLD: Pero, en este caso, al ser el primero que aparece en escena con ese nivel de inteligencia, habría que suponer que la evolución hacia el mamífero fue el factor limitante, porque en definitiva se dispuso antes de un período muy largo en el que existieron toda clase de animales distintos que no se desarrollaron en este sentido; por lo tanto, las probabilidades en su

caso debieron de ser pequeñas. Para la gran multitud de reptiles que existieron durante millones de años, la probabilidad de desarrollarse y dar seres inteligentes debe de haber sido muy pequeña. Tiene que haber algo muy específico en los mamíferos. No está claro para mí por qué fue así..

MORRISON: En primer lugar sólo hay 300 millones de años de vida terrestre.

GOLD: De vida terrestre animal.

MORRISON: No es un período de tiempo muy largo. La vida vegetal empezó mucho antes –quizá 450 millones de años– mas para la vida terrestre animal sólo hay 300 millones de años. Esto es sólo una quinceava parte de la vida de la Tierra; por lo tanto no voy ni a decir que fuera necesariamente un paso muy difícil. Realmente se trata sólo de un tiempo breve. Otros 300 millones de años representarían sólo un efecto del 7 por ciento, y doblarían las posibilidades, lo cual es interesante.

GOLD: Pero la vida en el mar se desarrolló casi en este mismo intervalo.

MORRISON: No, en absoluto. Los delfines y las ballenas no son animales marinos. Son animales terrestres que regresaron y que demostraron una plasticidad interesante. Pero me gustaría plantear la siguiente cuestión que siempre me ha extrañado; la forma del pez. Si uno se plantea lo difícil que es desarrollar un ser que se alimente de peces nadadores rápidos en lo profundo del océano y que consiga una velocidad máxima de 30 millas por hora, lo que exige disponer de un buen tamaño –unos seis pies de largo, más o menos–, estoy seguro de que con un análisis simple no resolvería fácilmente un caso así. Y, sin embargo, tres especies de ese tipo se han desarrollado a partir de conjuntos de pasos completamente diferentes.

Como es lógico, los biólogos no las consideran lo mismo, pero a cualquier observador que las siga, y siga su actuación le han de parecer tan similares como un automóvil muy bueno y una vieja carraca, que no es el mismo coche pero hay que reconocer que hace lo mismo. Una de ellas es el ictiosaurio; otra un gran pez de hace 100 millones de años; y otra es un mamífero, el delfín. Todos alcanzan aproximadamente la misma velocidad máxima. La resistencia y las instalaciones electrónicas del delfín son mucho mejores, pero todos hacen más o menos lo mismo. Todos vivían de pequeños peces oceánicos y vivieron con mucho éxito. Llegaron por tres rutas diferentes y su función es la misma.

PLATT: Podría decirse que cada vez que se da una convergencia amplia de la evolución a lo largo de líneas diferentes como en estos casos, tiene que tratarse de un proceso casi cierto. Por lo tanto, lo que tenemos que estudiar son los pasos en los que no tenemos pruebas de convergencia. Tenemos que mirar con mayor atención allí donde haya una posibilidad de convergencia.

SAGAN: Realmente es muy difícil, porque en algunos casos la evolución convergente elimina a los predecesores; por lo tanto, resulta imposible encontrar la convergencia. Por ejemplo, la convergencia en el origen de la vida. Aunque la química de la Tierra fuera actualmente la adecuada para el origen de la vida, sería imposible que volviera a ocurrir ahora por un motivo que Darwin reconoció, a saber, que los animalitos serían devorados por los que están ya presentes.

En cuanto a la afirmación del doctor Morrison según la cual 300 millones de años representan sólo el 7 por ciento de la edad de la Tierra, digo de nuevo que el origen de la vida probablemente tardó menos, con lo que el origen de la vida fue un fenómeno probable.

Me gustaría preguntar al doctor Hubel sobre la evolución convergente en el ojo.

CRICK: El ojo del calamar y el del mamífero.

HUBEL: Son muy diferentes.

MORRISON: No; actúan del mismo modo, ¿no es cierto? Consiguen los mismos resultados.

GOLD: Permítanme que diga unas cuantas palabras sobre el tema; lo he estudiado un poco. Si uno piensa que los dos ojos se desarrollaron por dos rutas totalmente distintas (quiero decir que el ojo del pulpo y el ojo del mamífero o del reptil no descienden de ningún antepasado común si uno no retrocede a una época muy anterior a la evolución de cualquier ojo, es decir, que se desarrollaron con toda independencia) y si uno estudia el diseño detallado de los dos ojos, uno ha de llegar a la conclusión de que son notablemente semejantes. De hecho

se parecen tanto que me atrevería a decir, aunque ignoro qué aspecto tendría otro ser de otro planeta, que si está altamente evolucionado y si se basa en los mismos mecanismos biológicos básicos que nosotros (no hay duda de que tendrá una forma corporal totalmente distinta, etc.) hay una probabilidad elevada de que sus ojos tengan un aspecto bastante semejante.

El ojo del pulpo dispone de una mecánica del iris bastante igual, tiene la retina invertida de modo que uno puede notar la diferencia, pero incluso con el microscopio continúa presentando un conjunto impresionante de estructuras que parecen similares en detalle.

MORRISON: Y tiene una historia embriológica precisamente opuesta.

HUBEL: Algunas cosas son iguales; otras, muy distintas. Las células receptoras hiperpolarizan cuando uno dirige la luz sobre las de un ojo vertebrado, y despolarizan en las de un invertebrado.

GOLD: Me gustaría atacar nuestra anterior sensibilidad al discutir el desarrollo de la inteligencia de un modo relacionado demasiado estrechamente con el desarrollo de la inteligencia humana. Por ejemplo, podría visualizar en cierto modo una discusión como la nuestra, pero en otro planeta, en circunstancias diferentes, y podría muy fácilmente imaginar una circunstancia en la que los pequeños monstruos discuten que para poder desarrollar la inteligencia, es necesario ser muy pequeño, no tener individualidad, no tener personalidades individuales, quizás una organización social en este ejemplo concreto.

Imaginemos el caso de unos animales pequeños, como insectos (ya saben que los insectos que viven en grandes grupos como las hormigas, se comunican entre sí: las hormigas lo hacen meneando los vientres). Concedo que la cosa resulta muy lenta. Pero supongamos que algunos insectos más hayan desarrollado una comunicación estableciendo contactos eléctricos entre sí.

Supongamos que hayan desarrollado contactos eléctricos para comunicarse entre sí y que lleguen a un resultado muy exótico, como la posibilidad, por ejemplo, de establecer contacto directo nervioso por vía externa. Supongamos que se les pide inicialmente que realicen algún trabajo importante de construcción, propio de hormigas, de ingeniería civil. Puedo imaginar un desarrollo de la inteligencia producido por el enlace mutuo en formas particulares, primero de unos cuantos y luego de millones de ellos, de modo que desarrollen paulatinamente formas de conexión mutua hasta que el grupo pueda elaborar como un todo cálculos muy complejos. Y luego dirían, si estuviesen discutiendo este caso...

SAGAN: Cuidado, ellos no.

GOLD: Dirían que para alcanzar una inteligencia superior lo que se necesita es, primero, nervios pequeños para poder conectar una gran cantidad de ellos en estructuras complejas; segundo, ser semejantes o por lo menos semejantes dentro de subgrupos para no introducir errores, del mismo modo que uno quiere transistores que se parezcan.

Luego dirían que ningún organismo solo puede dar buen resultado porque cuando muere –y comprenderían que cualquier ordenación química llega eventualmente a funcionar mal–, se pierde toda su memoria y su capacidad aprendida. En cambio, en la tribu de las hormigas cuando una de ellas cae muerta, llega otra, la aparta del camino y se conecta en su lugar, con lo que sólo se ha producido una interrupción temporal de una cadena y puesto que hay muchas cadenas redundantes no se perdió nada. Por lo tanto, la organización vive eternamente y ellos considerarían este hecho como una ventaja enorme para el desarrollo de una inteligencia superior.

Nuestra conclusión debería ser que hay que pensar con mucha amplitud sobre las condiciones para el desarrollo de la inteligencia y no considerarnos tanto como un modelo de las condiciones a satisfacer.

CRICK: Uno de los enlaces más débiles es, en mi opinión, el pequeño tamaño de la neurona, sobre lo cual carecemos de todo conocimiento general; de hecho podemos decir que si miniaturizamos las cosas, una neurona resulta muy grande a nivel molecular; ¿podría preguntar al doctor Minsky cuál es el número total mínimo de elementos necesarios para la inteligencia?

MINSKY: Creo que es probable tecnológicamente que se puedan meter 10^{12} elementos en un milímetro dado dentro de los próximos 50 o 100 años, por lo que en principio se podría disponer de un cerebro así de pequeño. Pero no sé si podría construirse genéticamente.

Querría formular dos observaciones que participan de la

naturaleza del chauvinismo. Leí un artículo de Isaac Asimov donde construía un argumento en favor de la probabilidad de la forma humana, que resultaba bastante bueno. Por ejemplo, un argumento era que los centros sensoriales, importantes y potentes, debían estar conectados al cerebro por rutas bastante cortas para que el animal pudiese disponer de tiempos de respuesta breves. Tenía un argumento en favor de la simetría bilateral y también el argumento usual de que es muy bueno disponer de un buen par de manos enfrente del cuerpo, donde los ojos pueden ver lo que hacen. El pulpo tiene algún problema con eso; de hecho no coordina muy bien las extremidades con los ojos.

Asimov nos da, pues, una probabilidad bastante elevada para un gran número de caracteres humanoides.*

En cuanto al tema de la inteligencia extraterrestre creo que, por lo menos a partir de lo que ya sabemos sobre la inteligencia, algunos aspectos de ella serían necesarios, aunque diésemos de lado los detalles. La capacidad para utilizar el conocimiento es importante en la inteligencia. Es probablemente muy importante poder obtener conocimientos y transmitirlos. No es muy importante poder generarlos. La capacidad de crear nuevas ideas es muy poco importante si uno está dentro de una cultura. Ninguno de nosotros genera muchas ideas, o por lo menos no reconocemos nuestras deudas: que cada palabra del lenguaje lleva aparejado un concepto de nuestra cultura. Acaso sea más fácil comunicar con un científico joviano que con un adolescente americano.

Pertenece a la naturaleza de la inteligencia la capacidad de construir un conocimiento abstracto, y esto se parece mucho a lo que dije antes con respecto a la computadora universal. Cuando uno puede almacenar conocimientos y crear nuevos procedimientos en la cabeza, uno se pone en marcha y los utiliza para modificar y utilizar otros tipos de conocimiento. Lo que uno piense dependerá mucho más de la propia cultura que del funcionamiento de su cerebro. En otras palabras, creo que ha de darse un tipo de convergencia enormemente importante. La capacidad de poner en marcha varios tipos de programas de computadora de acuerdo con instrucciones recibidas de su cultura es el elemento clave de la inteligencia, y lo extraño de nuestros extraterrestres serán las peculiaridades de su cultura. Pero creo que habrá una convergencia, como

* Véase también R. BIER, «Humanoids on other planets», *American Scientist* 52, 1964, p. 452. *(Nota del editor.)*

sucede en los objetos necesarios al ojo que le obligan a esa convergencia. Se necesita una especie de iris, hay que tener una lente, hay que tener una retina, y la cosa se conforma de tal manera que no quedan muchas alternativas para diseñar un ojo que forme imágenes. Creo que lo mismo sucederá con un cerebro manipulado por conceptos. Tiene que ser capaz de tratar series arbitrarias de símbolos. Deberá ser capaz de formar algunos tipos de asociaciones. Tendrá que ser capaz de comparar dos series de símbolos y ver las listas diferentes. Tendrá que disponer de un almacén temporal que pueda retroceder, que haga descender los objetos en orden inverso a como entraron impulsados por el programa.

Por lo tanto, creo que las cosas se presentan bastante favorables. La idea de ciencia-ficción de que existen extraños que lo son tanto que no podemos hablar con ellos, aunque sean inteligentes, creo que resulta improbable si se trata de científicos. Uno puede imaginar siempre una ciencia completamente extraña, pero no puede imaginar que los científicos no sepan de qué estoy hablando.

PLATT: ¿Cuántas neuronas se necesitan para crear la inteligencia? ¿Tiene alguien idea del número mínimo de neuronas: 10^{10} o sólo 10^6? ¿Es posible que estemos utilizando las nuestras con muy poca eficiencia? Si el número es de 10^6 podríamos alcanzarlo mucho más rápidamente en la evolución en algún otro lugar.

MINSKY: Creo que 10^6 bastan para crear la inteligencia; si todas las neuronas están situadas correctamente, 10^6 es suficiente para crear una computadora bastante lista en su funcionamiento básico. Pero no creo que sepa lo suficiente para ser muy útil. Por lo menos nuestra experiencia demuestra que nuestros programas comienzan a ser interesantes y versátiles cuando disponen de 10^6 bits.

PLATT: ¿Está usted identificando bits y neuronas?

MINSKY: Desde luego, porque creo que es arriesgado atribuir demasiada inteligencia a una neurona. Creo que lo más probable sea que muchas neuronas del sistema nervioso estén organizadas en grupos y de otra manera para inmunizar el proceso del pensamiento de la variabilidad de las neuronas. El pensamiento es muy preciso y reproducible y probablemente hay todo tipo de inteligentes mecanismos para impedir que las

variaciones sinápticas de las neuronas se interfieran con él. Por consiguiente doy muy poca fe a las teorías que quisieran situar la memoria en el nivel molecular o que intentan sacar mucha información de una sola neurona. Estamos intentando conseguir el dinero necesario para construir una computadora de 10^{12} bits.

HUBEL: Creo que no sabemos qué pensar cuando se plantea la cuestión de bits y neuronas. Lo importante a mí me parece obvio. Si cada neurona tiene la forma de un roble y dispone de 100 000 conexiones sobre ella, nos pasaremos de muchos órdenes de magnitud si hablamos simplemente de número de neuronas en lugar de número de conexiones. La segunda cosa es que muchas neuronas son semejantes, son muy parecidas a sus vecinas, y en algunas estructuras uno tiene algo parecido a un cristal.

MINSKY: La memoria de una computadora parece un cristal.

HUBEL: A eso me refería. Éste es otro aspecto de toda la cuestión. Si esto es cierto, deberíamos hablar de un número muy grande de neuronas, pero también de un número de tipos de neuronas, que es mucho menor. Por lo tanto, no vamos a subrayar lo que constituiría una red de 10^{10} o de 10^{12} bits. O deberíamos hablar en consecuencia del número de conexiones. El número de conexiones existentes es muy superior a 10^{10}. Quizá sea más bien de 10^{15} o 10^{16}.

Así pues, cuando uno pide cuántas neuronas se necesitan para formar la inteligencia, no creo que la pregunta tenga mucho sentido. Quizá no sea la pregunta correcta.

MORRISON: Es muy difícil atribuir un sentido a números tan absolutos si uno no sabe cómo funcionan los componentes y cómo corregirlos. Los resultados crecen muy rápidamente al aumentar el número de elementos. La función tiene una pendiente muy fuerte.

MINSKY: Estoy de acuerdo en que las conexiones superan a las neuronas en 10^3 o 10^4. Por otra parte, en la computadora, 10^6 bits es el mínimo para conseguir programas interesantes, y 10^{12} supera en mucho a lo que pueda imaginarse necesario para crear la inteligencia. Con una computadora se utilizan estos bits muy efectivamente. Se puede escribir el programa sin redundancia. Creo que ese factor de 10^3 o 10^4 está compensado por la ineficacia con que las neuronas son utilizadas en el cerebro. Hay problemas referentes a que la mayoría de las neuronas cerebrales no están en los puntos correctos para ser ni siquiera utilizadas. Digo solamente que la eficiencia del cerebro es baja.

ORGEL: Esto me suena a exageración de computadora.

MORRISON: Iba a decir que disponemos de algunas, aunque pocas, guías empíricas. Me interesaron las observaciones del doctor Lee cuando demostraba que, en su opinión, según creo, para pasar de un simio muy manipulador a algún tipo de formación social elaborada se precisaba un factor más o menos de 5 en capacidad cerebral.. Sospecho que éste es el tipo de función con pendiente muy pronunciada que nos está ocupando. Creo que esta idea, según la cual la inteligencia es altamente no lineal en relación al número de bits, probablemente resulte una consideración importante en la escala temporal de la evolución de la inteligencia.

La situación cualitativa cambia cuando el número de bits cambia de un modo más bien pequeño si uno se refiere a un valor tan fundamental como el número de interconexiones.

No hay duda de que el paralelo entre el cerebro del simio y el del ganado es muy correcto. Es tan correcto como pueda darse, me imagino, en biología. Todos sus substratos, etc., son, de un modo bastante razonable, los mismos. Sin embargo, si tenemos que dar algún crédito a la capacidad cerebral, resulta que un cambio más bien pequeño en el volumen significó una gran diferencia en comportamiento. Espero que éste sea un caso muy típico.

HUBEL: El delfín tiene un cerebro muy grande.

GOLD: Un delfín tiene un cerebro mayor y más complejo y con más neuronas que el nuestro, y no parece que haga muchas cosas con él.

SAGAN: Lo mismo sucede con las ballenas. Pero quizá tengan una tradición verbal muy extensa. La falta de órganos de manipulación como las manos puede ser el paso limitador en el desarrollo de lo que podríamos reconocer fácilmente como una inteligencia superior. Sin embargo, hay una gran cantidad de datos anecdóticos sugerentes de que los cetáceos son listos.

PLATT: Quisiera hacer una pregunta a Lee sobre lo que nos dijo antes acerca de los bosquimanos. Dijo algo en relación a que sólo disponían de un centenar de palabras para cosas tecnológicas.

LEE: Tienen sólo cien palabras para objetos materiales, para la cultura material.

PLATT: Pero ¿no es cierto que tienen un alto número de palabras para su ambiente?

LEE: Desde luego.

PLATT: Tienen un nombre para cada árbol, para cada pájaro, individualmente, etc.; luego, no está muy clara la conclusión que sacó de ello.

LEE: Mi argumento general era que su inteligencia parecía haber evolucionado por encima de sus necesidades adaptativas y que podemos tener coexistiendo una inteligencia altamente evolucionada y una simplicidad tecnológica.

GOLD: Pero ¿cómo sabe usted que la inteligencia de los bosquimanos evolucionó? ¿cómo sabemos que sus antepasados, antes de ser bosquimanos, no eran igualmente inteligentes sino que vivían en circunstancias totalmente diferentes de las que uno conoce ahora?

LEE: No creo que tengamos ninguna base para esta suposición. Tenemos pruebas arqueológicas de los bosquimanos que se remontan a unos cincuenta mil años y dan indicación de algo que en todos sus aspectos es ancestral de los bosquimanos. ¿En qué tipo de antepasado distinto pensaba?

GOLD: Cincuenta mil años no es un período de tiempo muy largo, pero yo imagino que la inteligencia...

LEE: Para un pequeño número de objetos sí que lo es. Quizás esté usted hablando de alguna involución hipotética o caída de un estado de gracia, pero no creo que eso se considere seriamente como una hipótesis en antropología.

SAGAN: Me pregunto si podemos pedir al doctor Orgel que dedique un minuto a los temas que él considera principales en la discusión de este poco estructurado debate.

ORGEL: Mi primer punto era la cuestión muy pertinente de Minsky sobre qué deberíamos hacer si adoptamos el punto de vista muy crítico de Francis Crick. A lo que Francis contestó: «Sólo se puede mirar donde haya luz; no conviene mirar en otras partes.» A lo que Carl Sagan contestó a su vez que en realidad disponemos de estrategias alternativas. Esto me parece señalar un punto: antes de acabar tendremos que enfrentarnos con esta cuestión, porque no podemos escapar de un modo totalmente agnóstico diciendo que no es posible hacer nada por que no sabemos nada.

He pensado que la discusión sobre la evolución del ojo fue interesante pero no conclusiva, porque nuestros expertos no parece que se hayan puesto de acuerdo sobre si el grado de semejanza entre los ojos era sorprendente o no. El siguiente punto que me gustó fue el ataque de Tommy Gold sobre el jingoísmo de la especie, y principalmente la idea de alguna especie de hormigas que podría reunirse, estudiarnos y considerar que hacemos las cosas de un modo más bien pobre.

La única otra nota sobre algo que por no estar implicado en ello me dejó tiempo de anotarlo fue el argumento de Minsky en favor de los humanoides, que me pareció interesante, junto con el argumento de Asimov, y también la posterior afirmación de que era más importante poder utilizar el conocimiento que no originarlo.

Por si alguien se siente poco valorado, tengo que decir que si no lo he anotado todo ha sido sin duda porque estaba escuchando con un interés demasiado intenso.

PLATT: Como ya han sugerido varios, en esta conferencia deberíamos generalizar la ecuación (1) para incluir un gran número de factores f, o probabilidades de varios pasos secuenciales en la evolución, hasta alcanzar el nivel de la comunicación extraterrestre. Sin embargo, el efecto de este aumento en el número de factores f para reducir la probabilidad total y el número total de ETI, N no es tan grande como han supuesto McNeill y otros. La tabla 1 muestra el estado de nuestro conocimiento sobre estas probabilidades para unos 25 pasos de este tipo, bastante representativos. Casi la mitad de ellos parecen «seguros», y están marcados con una «S», en el sentido de que sabemos que se dan en todas partes (quemogenia de pequeñas moléculas orgánicas) o que son teóricamente seguros

TABLA 1
PROBABILIDAD DE DIVERSAS ETAPAS DE LA EVOLUCIÓN

Implicaciones	«Seguro»[a]	Probabilidad desconocida[b]	¿Puede ser baja?[b] (¿única?) (¿crucial?)
quimigenia en un campo de radiación	S		
ciclos autocatalíticos (Zahlan)[c]	S		
origen de la vida			←
proteína/ácidos nucleicos		?	
primeras células		?	
organismos multicelulares		?	
(fotosíntesis → O_2) (¿puede ser no necesaria para la evolución?)		?	
animales		?	
red nerviosa / cordados	S		
ojos	S		
animales terrestres		?	
sistema nervioso de aprendizaje	S		
animales sociales	S		
señales de comunicación	S		
(mamíferos) (¿Pueden no ser necesarios para la evolución?)			
(familias) (¿Pueden no ser necesarias para la evolución?)			
coordinación mano-ojo	S		
herramientas	S		
curiosidad	S		
fuego (creo que es necesario para el lenguaje y la tecnología)[d]		?	←
lenguaje símbolos[e]			←
poblados (¿sincronizados con la era glacial?)		?	
tecnología	S		
ciudades	S		
astronomía y ciencia	S		
energía nuclear y espacio	S		

a. Se supone «seguro» si hay una convergencia evolutiva de varios casos independientes. Esto significa que $f = 1$; o más bien que $f = 1 - \delta$ donde «δ puede hacerse inferior a cualquier número dado en un tiempo finito ε», de modo que la consecución de estas fases no es cuestión de «probabilidad», sino de *tiempo* (supuesto $\leqslant 10^9$ años).

b. Problemas que precisan un estudio especial.

c. ¿Pueden los ciclos autocatalíticos garantizar el origen de la vida? (¿O son equivalentes?)

d. ¿El *fuego, que alarga el día,* junto con los *animales sociales / familias* pueden garantizar el lenguaje?

e. ¿Cuál es la probabilidad del *fuego* y / o del *lenguaje simbólico*?

(construcción cíclica autocatalítica en un campo con flujo de energía), o que han ocurrido independientemente en múltiples casos (evolución convergente) en la Tierra.

Dicho con más precisión, en estos casos S, la probabilidad de cada paso sucesivo f puede acercarse indefinidamente a la unidad, tras repetidos intentos múltiples independientes, si ha transcurrido un tiempo suficiente. El paso es «matemáticamente seguro» en el sentido técnico exacto de que $f = 1 - \delta$, y δ puede hacerse menor que cualquier número dado en un tiempo finito, ε.

En la mayoría de los demás pasos de la tabla 1, la probabilidad es desconocida (marcada con un interrogante) y precisa de un estudio más cuidadoso; aunque en mi opinión y en las opiniones expresadas por Sagan, Orgel, Crick, Hubel, Flannery y Lee la mayoría de estos pasos pueden seguir casi necesariamente de los pasos precedentes y por lo tanto son «seguros» o S, en el mismo sentido. (Las flechas descendentes de la parte izquierda de la tabla indican que algunos pasos sucesivos están «implicados» de modo casi seguro por los pasos precedentes.)

Sin embargo, hay tres pasos que pueden haber sido únicos (en la tabla están indicados por negritas y por flechas horizontales) y en el momento actual se les han de asignar probabilidades desconocidas entre 0 y 1 (como han subrayado Crick y otros) hasta que dispongamos de más pruebas teóricas o experimentales sobre el grado de inevitabilidad de tales pasos. Estos tres pasos son (1) el origen de la vida, (2) el uso del fuego (en mi opinión), y (3) el desarrollo del lenguaje simbólico (que puede identificarse con el paso a la «inteligencia»). Está, por lo tanto, justificado que dos de ellos, por lo menos, aparezcan como incógnitas cruciales en la ecuación (1): se trata de f_l y f_i. (El último término de probabilidad, f_c, para la comunicación está representado por las dos últimas líneas de la tabla 1, «astronomía y ciencia, energía nuclear y espacio», que yo considero como una consecuencia «segura» de los pasos precedentes, o S en el sentido antes indicado.)

Creo que un poco más de trabajo dividiendo estos pasos cruciales en subpasos nos permitiría demostrar teóricamente que también son «seguros». Por ejemplo, la construcción cíclica autocatalítica de moléculas mayores en un campo con flujo de radiación fue recalcada hace unos cuantos años por el profesor Antoine Zahlan de la Universidad Americana de Beirut. Se puede establecer un «grafo dirigido» de todas las posibles especies moleculares, y los vectores del grafo muestran la velocidad del flujo de conversión de una especie en otra dentro

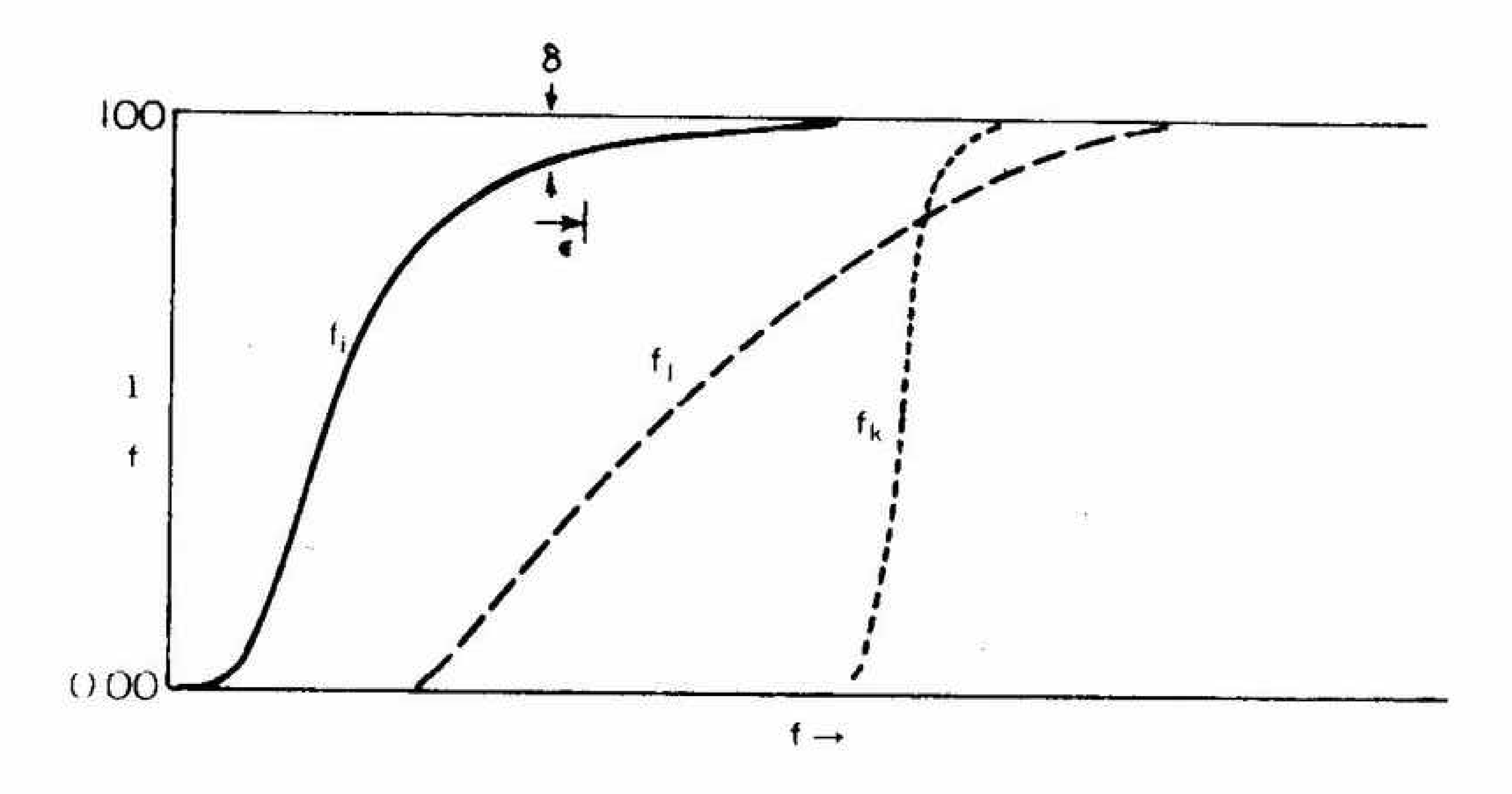
de un campo de radiación dado. (Si se elimina la radiación, las velocidades bajan a cero debido al equilibrio microscópico –vectores iguales y opuestos– que da una distribución simple de Boltzmann para las abundancias con esa temperatura.) En este grafo habrá muchos circuitos cíclicos A-B-C-D-A-B... movidos por la radiación, y entre estos circuitos habrá casi con seguridad muchos circuitos autocatalíticos de construcción y división A-B-D-D-2A-2B-... Por bajas que sean las probabilidades de tales construcciones, con el tiempo desembocarán en la construcción de todas las especies moleculares implicadas, A, B, C, D,... y de todos sus productos de descomposición; por lo tanto, desembocarán en la construcción secuencial de todos los circuitos autocatalíticos más complejos para sus moléculas precursoras, desembocando entonces en una «selección natural» en favor de una autocatálisis más eficiente en diversos ambientes, en función del tiempo.

Mucha gente podría considerar esta combinación de «autocatálisis más selección natural» como un equivalente al «origen de la vida»; pero en todo caso parece hacer casi inevitable el origen de «sistemas vivientes» más complejos, como sugiere la tabla 1. Creo que esta conclusión se deduce inevitablemente si en lugar de moléculas tomamos circuitos o *sistemas* autocatalíticos como las unidades sobre las cuales actúa la selección natural.

Del mismo modo en el caso del desarrollo del lenguaje simbólico, las probabilidades pueden resultar mucho mayores tan pronto como consideremos subpasos y pasos precursores como, quizá el uso del fuego. No estoy seguro sobre la probabilidad del uso del fuego, a causa de su peligro y de la repelencia experimentada por muchos animales, pero creo que muchos antropólogos lo considerarían «seguro» (en el sentido anterior), dada una población de animales terrestres que usan herramientas y que exhiben curiosidad en una atmósfera oxidante.

Una vez dominado el fuego, me parece que hace casi segura la transformación de las señales de comunicación del animal en símbolos y lenguaje. El motivo es que el fuego alarga el día, como tiempo dentro de la noche o como espacio en cuevas y lugares oscuros. Como dijo Lee, esto obliga al ocio, y el repertorio de señales de imitación y de comunicación, separado de sus referentes de caza, recolección o huida a la luz del día, sólo puede continuar emitiéndose como símbolos de cosas alejadas en el espacio y en el tiempo, dando origen al teatro, al ritual, a la historia, a la poesía, al mito y a la ciencia.

El resultado general de estas consideraciones aparece en la



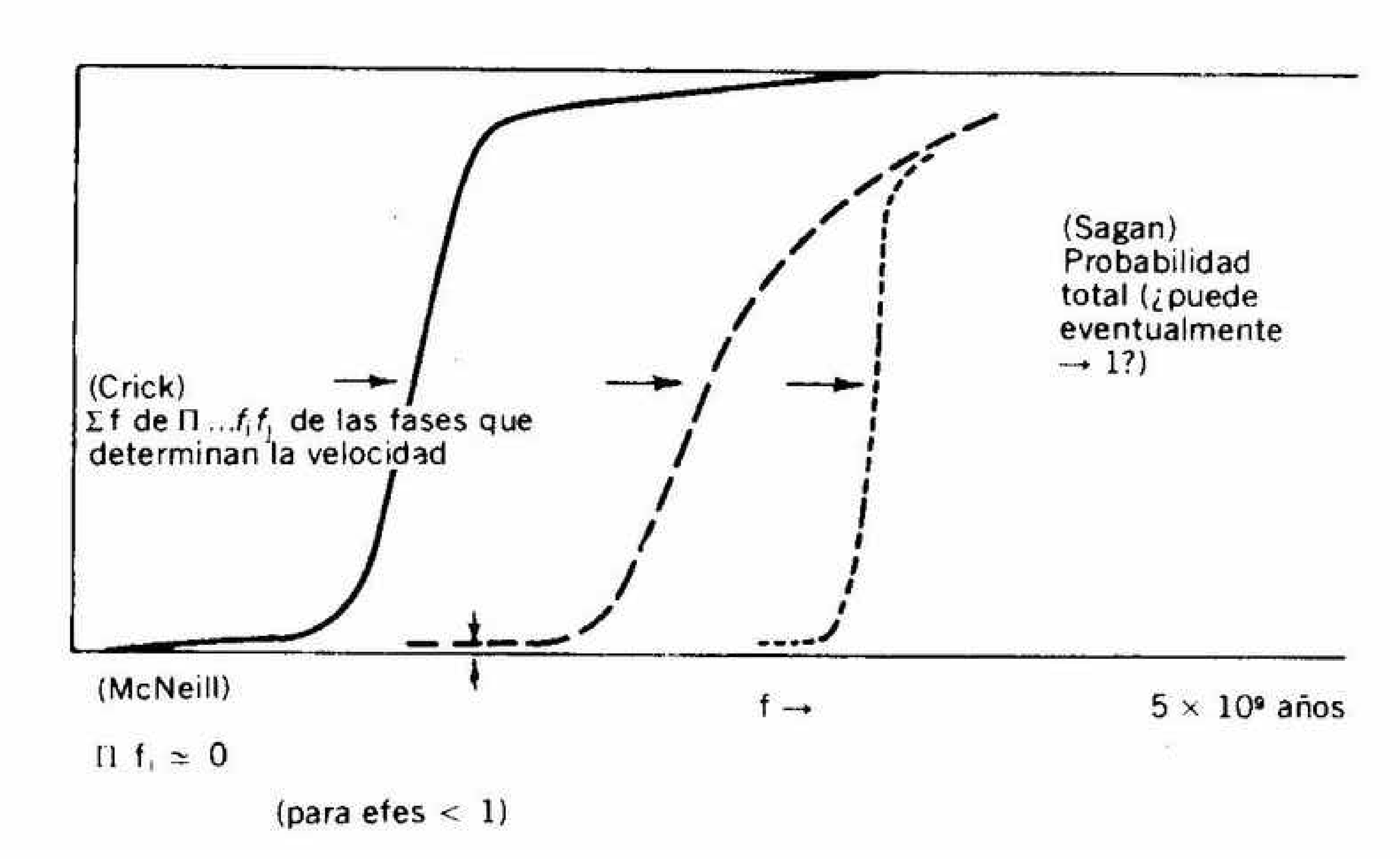


FIG. 10. Opiniones sobre el desarrollo en el tiempo de las probabilidades constitutivas *f* en la ecuación (1) en relación al desarrollo de civilizaciones técnicas en un planeta dado. Ver detalles en el texto.

figura 10. Es evidente que las probabilidades *f* en la ecuación (1) han de considerarse funciones del tiempo. Esto ilumina inmediatamente algunas de las controversias de esta conferencia, como las mantenidas entre Crick, McNeill y Sagan. Como puede verse en la parte superior de la figura 10, cuando los pasos precursores están en el pasado, cada una de las *f* crece con el tiempo en un intervalo dado de ambientes planetarios, y muchos de ellos pueden acercarse a 1,00 o a la «seguridad» en tiempos cortos comparados con los tiempos cósmicos. McNeill recalcaba correctamente que el producto de un gran número

de f inferiores a 1,00 es esencialmente cero. Pero también es cierto que si todos se acercan a la seguridad, 0,99, 0,999, etc., el producto de un número grande de ellos puede todavía crecer y acercarse a la unidad en un tiempo finito, y Crick hizo hincapié en que podría ser más provechoso no considerar las f, sino la suma de tiempos t de los pasos que determinaban la velocidad total. Por otra parte, Sagan y Drake –puesto que la ecuación (1) depende del tiempo– estaban menos interesados en las dependencias con respecto al tiempo que en el producto final de todas las f, al cabo de unos tiempos cósmicos que (confiemos) son largos comparados con todos los pasos que determinan la velocidad total en los sistemas planetarios de interés. Esta última suposición desde luego puede ser falsa y haber muchos tipos de sistemas planetarios que tienen f cruciales con constantes de tiempo de miles de millones de años o más.

LEE: No puedo hablar de autocatálisis, pero puedo decir algo sobre el origen del lenguaje. He seguido el argumento del doctor Platt con un interés creciente confiando en que haría algo que no se ha hecho hasta ahora, asignar una probabilidad al origen del lenguaje, pero luego dijo: «Ajá, éste es el problema.» Por lo tanto usted ha llegado, supongo que independientemente, a lo que llegó la profesión antropológica: que el problema está precisamente aquí.

Por lo tanto ignoro si con su argumento no ha hecho otra cosa que reiterar nuestra ignorancia. De hecho el lenguaje es una de las cosas más difíciles con que tenemos que enfrentarnos continuamente. Todavía no hemos realizado un avance decisivo en la comprensión de sus orígenes. Pero estoy de acuerdo con usted en que las herramientas, el fuego, y lo demás no presentan muchas dificultades.

OLIVER: Creo que lo que en realidad sucede es que la inteligencia se desarrolla por los diversos motivos que hemos conocido desde Darwin y Wallace, y a medida que la inteligencia se desarrolla tienen lugar automáticamente algunos de estos pasos debido a la gran inteligencia del individuo o de la especie en cuestión. Por ejemplo, no considero que el origen del lenguaje constituya un paso tan notable. Creo que muchos animales, por ejemplo cetáceos y pájaros, disponen de un lenguaje rudimentario. La diferencia entre su habla y la nuestra es una cuestión de grado y de abstracción, no de existencia o de no existencia; creo, pues, que debemos recordar siempre que, al

mirar nuestro pasado, estamos mirando un modo particular con el cual el hombre llegó donde está, pero que puede haber otros caminos que converjan hacia un destino similar.

Si cada uno de nosotros tuviera que calcular individualmente las probabilidades del aparejamiento de nuestros antepasados en una época bastante lejana, cada cual llegaría a la conclusión de que como individuos somos totalmente imposibles.

GINDILIS: El profesor Crick ha dicho que debemos distinguir claramente entre la cuestión de la incertidumbre al determinar un factor como f_1 y la cuestión del valor de ese factor. Estoy de acuerdo en que la confianza en el cálculo de estos factores es desde luego muy baja, pero me gustaría decir unas palabras en defensa del valor real de este factor. No estoy proponiendo ningún cálculo sino que simplemente me gustaría hablar del método para determinar f_1.

Muy a menudo se determina la probabilidad del origen de la vida como la probabilidad de una emergencia casual de una fluctuación termodinámica que puede dar lugar a la formación de un sistema complejo como el ADN o una molécula de proteína, y, puesto que esos sistemas son bastante complejos, no ha de sorprendernos que la probabilidad de tal acontecimiento pueda despreciarse por pequeña.

El profesor Sagan indicó como ejemplo de un cálculo así que la probabilidad de una reunión al azar de una proteína más bien sencilla es de 10^{-130}. A partir de esos cálculos se deduce a veces que la vida es un fenómeno raro, excepcional en el universo, y que nuestra Tierra simplemente ha tenido suerte al respecto. Me gustaría decir que el carácter erróneo de tal argumento prueba que un método tal, puramente combinatorio, es inaplicable al proceso de formación de un sistema complejo.

Si uno combina simplemente los elementos iniciales, en un período razonable de tiempo no se pueden ni obtener los sistemas más simples que se dan en la naturaleza, y mucho menos una molécula de proteína. Se puede plantear la cuestión afín de una formación puramente casual de un cristal de cloruro de sodio que consta sólo de sodio y cloro, pero donde el número de átomos en el cristal es grande. Elevaremos 2 a una potencia igual al número de átomos y obtendremos para la probabilidad de un cristal de sal una cantidad tan despreciable como las cifras que escribió el profesor Sagan en la pizarra.

La objeción es, desde luego, que en este caso entran en juego leyes físicas y no sólo el azar. Pero me parece que en la

formación de compuestos complejos actúan las mismas leyes físico-químicas, compuestos que son los precursores de la vida. Pueden evolucionar sistemas biológicos complejos de un modo tal que en cada estadio haya algunos subsistemas intermedios que, gracias a sus rasgos estructurales, parecen excluir la posibilidad de la formación en estadios subsiguientes del proceso de muchas de las combinaciones de elementos más simples posibles. En cada estadio del proceso se producen sólo ciertas combinaciones permisibles, y eso altera radicalmente el panorama.

Me gustaría explicar esta idea citando el ejemplo bien conocido del sistema del lenguaje. El lenguaje escrito tiene como elementos las letras del alfabeto. A partir de esas letras y mediante ciertas regularidades, obtenemos palabras. A partir de palabras construimos frases y también aquí gobiernan el proceso determinadas leyes. Esto conduce al resultado de que un gran conjunto de combinaciones permisibles a priori de letras no ocurren nunca en un texto con sentido.

Es bien conocido que en la teoría de la información hay un teorema según el cual el número de frases sin sentido es mucho mayor que el número de frases con sentido, pero su probabilidad total puede ser lo pequeña que uno quiera.

Creo que lo mismo es válido en el proceso de la formación de sistemas materiales complejos. En este sentido la evolución química es también como una narración. Cuando ha quedado completo un párrafo de su narración evolutiva, la naturaleza predetermina varias «letras», «palabras» y «frases» subsiguientes. Pero no sabemos lo que habrá escrito la naturaleza hace millones de años. Yo visualizo la evolución química como un proceso ergódico que puede describirse como un proceso que posee una cierta redundancia, y cuanto mayor es la redundancia más se acerca el proceso a un proceso termodinámico.

Pero sabemos que para cada proceso al azar hay un tiempo característico después del cual el proceso tiene lugar inevitablemente. Esto es más cierto todavía en el caso de un proceso cuasi dinámico, aunque entonces el tiempo característico se ha de determinar teniendo en cuenta las conexiones cuasi dinámicas a que antes me referí; y eso puede comportar una reducción del tiempo característico. En el análisis final ha de incrementar la probabilidad de la realización del proceso como un todo.

Si este tiempo característico en el proceso de formación de la vida, la emergencia de la vida, es menor que el tiempo de existencia del planeta, la vida ha de aparecer necesariamente

en este planeta. Por lo tanto, el factor f_l puede interpretarse como la probabilidad de que el tiempo característico para la emergencia de la vida sea menor que el tiempo de existencia del planeta.

Sabemos que esta condición se cumplió en el planeta Tierra. Sin embargo, el tiempo característico para la Tierra, como se ha dicho repetidamente y fue señalado en nuestras discusiones por el profesor Crick, puede ser del mismo orden de magnitud que la edad de la Tierra. La diferencia ligera en las condiciones físicas en otros planetas podría aumentar el tiempo característico en uno o dos órdenes de magnitud. Luego, para la emergencia de la vida en algunos de estos planetas se habría necesitado un tiempo superior al disponible.

Una consideración así es importante porque puede reducir substancialmente f_l. Pero si la confianza en la determinación del factor es pequeña, las cosas no son mejores en relación con otros factores.

Creo, desgraciadamente, que en el nivel actual de nuestro conocimiento no estamos en disposición ni de estimar aproximadamente el número de civilizaciones en el universo; siendo esto así, considero la proposición concerniente a la existencia de civilizaciones como una hipótesis. La hipótesis me parece muy probable, pero no por eso deja de ser una hipótesis. Continúa siendo una hipótesis, y en este aspecto las cosas han cambiado poco en relación a cincuenta, cien o mil años antes. De hecho la hipótesis de la pluralidad de mundos habitados es tan vieja como la antigua filosofía hindú.

Sin embargo algo ha cambiado fundamentalmente. Está el hecho de que ahora por primera vez en el curso del desarrollo de la ciencia hay medios para verificar esta hipótesis. Me refiero ante todo al hecho de que las modernas instalaciones de radio permiten registrar señales enviadas a corresponsales situados a distancias interestelares. Como es lógico, la posibilidad de detección depende de la potencia de que dispone el emisor, su alejamiento, y de una multitud de factores más, que discutiremos más adelante en el simposio. Ahora sólo quiero decir que lo importante es estar en disposición de detectar estas señales, aunque en ciertas condiciones. Pero esta detectabilidad cambia por sí misma radicalmente el panorama porque permite pedir que se realicen investigaciones experimentales en este campo.

Esas investigaciones pueden basarse al principio en los logros de la astronomía, la radioastronomía, la cibernética, la teoría matemática de las comunicaciones, etc. Tienen algo a

que referirse. Por este motivo creo que disponemos ya de las instalaciones técnicas y de los métodos para iniciar el trabajo de detección. Dadas estas condiciones, me parece sería un error exigir pruebas independientes que confirmen la existencia de civilizaciones extraterrestres antes de que iniciemos esta investigación sistemática.

ORGEL: Cuando el doctor Crick y yo decimos que la probabilidad del origen de la vida no puede estimarse con ninguna confianza, no basamos nuestra opinión en el supuesto de que la vida se originó como un solo accidente combinatorio. A base de una labor experimental y teórica sobre el tema, opinamos que nuestra ciencia no ha progresado todavía hasta el punto de poder hacer una estimación con sentido.

Sin embargo, aunque sea imposible determinar la probabilidad de un acontecimiento, todavía puede ser posible decir que esta probabilidad resulta incrementada por una serie de observaciones. Por lo tanto, quisiera expresar cierto desacuerdo con la última intervención, cuando se dijo que nada de lo sucedido en los últimos cincuenta años cambia nuestra opinión sobre la probabilidad de la emergencia de la vida. No puede negarse que los experimentos de Stanley Miller, que demostraron por primera vez que los materiales orgánicos del tipo existente en los organismos terrestres pueden hacerse en el laboratorio en condiciones notable y sorprendentemente sencillas, han aumentado la probabilidad –han aumentado nuestra estimación de la probabilidad– de que la vida pueda originarse espontáneamente; pero, por desgracia, no ha aumentado hasta el punto de poderle asignar con alguna confianza un valor elevado.

MUKHIN: No acabo de entender cómo podemos estimar f_1 en la ecuación (1) si no podemos escoger ningún método racional para evaluar f_1. Creo que puede decirse correctamente que no es posible dar una estimación segura. Quizá debemos aceptar que estas probabilidades son iguales a 1, puesto que estamos todos aquí y que esta prueba no puede ignorarse. Muchas otras estimaciones serán completamente arbitrarias. Pero otros dicen que mientras no conozcamos todos los estadios en el proceso del origen de la vida en la Tierra, no podemos evaluar la probabilidad de ese acontecimiento.

Me parece que eso no está del todo justificado. En mi opinión es mejor proceder con el supuesto de que en el universo no puede haber objetos únicos.

SAGAN: Como he dicho ya varias veces, nos enfrentamos con problemas muy serios al extrapolar en algunos casos a partir de un solo ejemplo, y, en el caso de *L*, de ningún ejemplo. Cuando hacemos estimaciones no podemos pretender que esos valores sean seguros. No estamos aplicando un sentido de probabilidad estadística a los últimos factores de la ecuación (1). Estamos haciendo probabilidades subjetivas en el sentido del profesor Fine (apéndice A). Su *único* valor consiste en ponderar el esfuerzo, el tiempo y el dinero que estamos dispuestos a dedicar al problema.

La historia de la ciencia está repleta de una especie de gran principio muy semejante a lo que dijo el doctor Mukhin cuando afirmaba que lo que tenemos en la Tierra no es de ningún modo único, idea asociada a veces con el nombre de Copérnico. Quisiera mencionar un caso (hay muchos más) en el que esta simple suposición permitió unas estimaciones cuantitativas correctas. Es un cálculo realizado por Huygens e independientemente, y de un modo ligeramente distinto, por Newton. Huygens afirmó que el Sol era una estrella, y que en ningún aspecto significativo se diferenciaba de otras estrellas. Conocía la ley del cuadrado inverso para la propagación de la luz y por lo tanto se preguntó a qué distancia debería estar el Sol para que fuese tan brillante, por ejemplo, como la estrella Sirio, que supuso tenía la misma luminosidad intrínseca del Sol.

Hizo luego un conjunto de agujeros en una plancha de latón, agujeros de distintas aperturas; puso la plancha contra el Sol e hizo una estimación sobre el agujero cuyo brillo era como el de la estrella Sirio, que recordaba de la noche anterior: el fotómetro no era muy preciso, pero lo notable del caso es que su cálculo dio una distancia a Sirio de algo así como medio año luz. Y si hubiese sabido que Sirio era intrínsecamente mucho más brillante que el Sol, hubiera hecho un cálculo todavía más preciso.

Éste es un ejemplo –hay muchos más– donde resulta posible efectuar estimaciones semicuantitativas de lo que yo llamo el supuesto de mediocridad, es decir, que lo que está en la Tierra es bastante característico de lo que está en otras partes. El argumento no es riguroso pero creo que constituye una especie de guía.

DEBAI: Quiero hablar de algunos factores que no se han mencionado todavía. Me refiero a la influencia de la Luna. La vida apareció en la fase líquida. Una evolución tecnológica es posible en un suelo sólido y en la Tierra eso dependía de las

mareas lunares, en el curso de las cuales los animales marinos aprendieron a respirar. Si esto es cierto, impone una limitación severa sobre la repetición de un mundo así, porque la ausencia de un satélite adecuado, a una distancia adecuada, reduciría por un factor grande la probabilidad de la evolución de animales grandes.

Mi segunda observación se refiere a los criterios concernientes a lo artificial y a lo natural. Estoy totalmente de acuerdo en que no hay objetos únicos en el universo; eso nos permitirá probablemente distinguir entre señales naturales y artificiales. Lo cierto es que los objetos naturales obedecen a las leyes de selección mientras que la imaginación humana no está sometida a estas limitaciones. Por lo tanto, la semejanza de un fenómeno con otro presenta señales claras de su carácter natural.

Me voy a referir a dos ejemplos bien conocidos: el primero, el descubrimiento de CTA 102, la bien conocida fuente de emisiones de radio. Cuando era la única se dijo rápidamente que era artificial, pero cuando aparecieron muchas de estas fuentes se abandonó la idea de artificialidad. El segundo ejemplo se refiere a los púlsares. El primer púlsar no se calificó de natural o de artificial y los observadores esperaron muy astutamente a descubrir otros objetos de aquel tipo. La existencia de un gran número de objetos demostró inmediatamente que no eran artificiales.

Como ven, pues, la naturaleza es uniforme y la inteligencia es diversa.

AMBARTSUMIAN: ¿Cuántos años necesitaremos para descubrir el segundo objeto en nuestro problema?

GOLD: Me gustaría decir dos cosas sobre las mareas. Una es que en mi opinión la existencia de las mareas no hace la situación intermedia más fácil sino más difícil. Sería más difícil para un animal adaptarse a la tierra desde el agua si tuviese que soportar las circunstancias intermedias de la inundación de las mareas.

Segundo, en todo caso la ausencia de una Luna dejaría todavía unas mareas solares con una altura de un tercio de las actuales. Por lo tanto, no creo que pueda esperarse mucha diferencia en la vida real entre una situación con Luna y otra sin Luna, en relación a la adaptación al territorio costero partiendo del agua.

TOWNES: Creo que es muy difícil formular el tipo de afirmaciones absolutas que resultan atractivas de formular. Por ejemplo, en el caso de la Luna, creo que no están nada claras las ventajas o desventajas desde un punto de vista evolutivo. Basta, por ejemplo, con el contraargumento de que en la naturaleza son precisamente las condiciones difíciles las que se prestan a una evolución más bien rápida, y es precisamente en las regiones muy planas, completamente uniformes, donde la evolución procede con lentitud. No digo esto como un argumento contrario a que la Luna sea buena para la evolución, sino como un ejemplo de lo difícil que resulta formular alguna afirmación.

Me gustaría ahora discutir el tema planteado por el profesor Sagan. El profesor Sagan recurría al principio de mediocridad. Considero muy difícil sacar conclusiones muy firmes de tales analogías. El principio de mediocridad, por ejemplo –y creo por lo menos que se trata del mismo espíritu–, indujo a las personas a creer que la vida se producía continuamente a nuestro alrededor, que las ranas eran generadas espontáneamente del fango cada año. Esto fue desmentido por Pasteur tras una labor larga y ardua, porque parecía totalmente contrario al instinto humano general de la naturalidad de la vida.

La vida, de hecho, y por lo menos en alguna escala pertinente, es del todo única y no se genera continuamente. Me parece que el mismo espíritu de mediocridad es el que impulsa a la gente a creer que nada de lo conseguido en el pasado puede mejorarse. Y, sin embargo, un descubrimiento en sí constituye un acontecimiento único en la historia de la humanidad. Sólo la creencia en la posibilidad del cambio o de nuevas situaciones nos impulsa a apartarnos de esa tradición.

Debo advertir ahora que lo dicho son desde luego simples analogías, y desconfío de tales analogías, pero del mismo modo desconfío de la analogía que el profesor Sagan ofrece como algo bastante convincente.

CRICK: Lo que ha dicho el profesor Townes es esencialmente lo que yo iba a decir, pero lo ha dicho tan cortésmente que me gustaría repetirlo. Uno no puede tomar una hipótesis y luego a partir de una estimación de su probabilidad compararla con una segunda hipótesis a no ser que exista alguna analogía estructural o que uno conozca la probabilidad de la segunda hipótesis.

SAGAN: El profesor Townes ha sido quizá demasiado educado, pero las palabras que ha utilizado son que uno no puede de este modo alcanzar «conclusiones muy firmes» y que uno no debe suponer que son «argumentos bastante convincentes». ¡Por favor! En esto estamos ciertamente todos de acuerdo. Nadie dice que estos argumentos tengan nada de rigurosos. Yo le daría la vuelta al argumento de Townes sobre la generación espontánea, y diría que si la gente no nace por generación espontánea, la suposición de mediocridad implica que las ranas tampoco.

El problema es en mi opinión que estamos acostumbrados a formular estimaciones de probabilidad en contextos muy diferentes. Permítanme que intente decir cuál es en mi opinión la función de lo que estamos haciendo. El motivo por el cual deseamos estimar estos valores de f es decidir si podemos permitirnos la búsqueda de inteligencias extraterrestres. Disponemos de la capacidad tecnológica para hacerlo. La cuestión es: ¿procedemos a ello?

Si resulta que hay algún argumento riguroso para excluir la inteligencia extraterrestre, una demostración convincente de un valor pequeño de N, una búsqueda de este tipo no constituiría una asignación útil de recursos. Si por otra parte no podemos excluirla, creo muy probable que intentemos dar con ella.

Algunas de las discusiones que he oído sonaban como si el hecho de que haya vida e inteligencia en la Tierra carezca totalmente de importancia. Eso me deja muy perplejo. Yo habría supuesto que por lo menos tiene una mínima importancia de cara al problema. Es el único caso donde resulta que tenemos datos. No es suficiente para deducir conclusiones estadísticas preliminares, pero seguramente tendrá alguna importancia. Si un solo caso carece de importancia, me pregunto cuántos casos son necesarios para que lleguen a tener importancia.

CRICK: Dos.

SAGAN: Dos casos son convincentes, me mantengo en ello. Un caso no es trivial. Pero esa respuesta vuelve a recalcar la importancia de la búsqueda de formas simples de vida en Marte, Júpiter y en otras partes del sistema solar con vehículos espaciales esterilizados.

Digo de nuevo que en el contexto de esta discusión nadie pretende atribuir a estas estimaciones una confianza ni tan

sólo moderadamente alta. La cuestión que hay que resolver es si hay algún argumento que excluya a las inteligencias extraterrestres, en cuyo caso buscarlas sería perder el tiempo. Si no podemos excluir a ETI y si la búsqueda utiliza instrumentos que en todo caso serían útiles para otras actividades astronómicas no relacionadas con ETI, más tarde o más temprano se emprenderá esta búsqueda.

MORRISON: Si hay algo más que decir sobre estos argumentos de probabilidad, podrán decirlo los teóricos de la probabilidad; es un problema complicado y creo que pueden manejarlo ellos. Creo que han expresado su opinión partidarios elocuentes de ambas posturas.

LA DURACIÓN DE LAS CIVILIZACIONES TÉCNICAS

L

SHKLOVSKY: Tengo ciertas dificultades al definir para mí mismo el tema de nuestro simposio. Parece ser que estamos discutiendo una nueva ciencia, una ciencia muy importante y muy interesante. Pero como saben, todas las ciencias naturales se basan en observaciones y experimentos. Aquí no hay nada de eso. Lo que estamos postulando es que, además de la civilización altamente organizada que conocemos en la Tierra, hay otras civilizaciones en otras partes del universo.

Otras ciencias –por ejemplo, la física– tienen postulados fundamentales de este tipo. No voy a entrar en ejemplos, pero, como saben, estos postulados son generalizaciones de descubrimientos experimentales. En nuestro caso el postulado –el postulado de la pluralidad de mundos habitados– descansa solamente en la lógica. En este sentido, el tema de nuestro simposio se parece a la geometría, que también se basa en postulados lógicos, pero creo que ni los más fieles de entre nosotros están tan convencidos de esa pluralidad como los expertos en geometría han estado siempre convencidos de que las líneas paralelas no se encuentran.

La ecuación (1) contiene unos cuantos factores. En nuestras anteriores discusiones nos hemos ocupado de todos los factores excepto de *L*. Nuestra discusión reveló un número bastante importante de certezas sobre ellos. En relación a uno de esos factores me gustaría contar a modo de ilustración (aunque desde luego no soy antropólogo y hablo como un lego) que una vez leí la hipótesis de que el desarrollo de una especie de primates prehumanos hacia el *Homo sapiens* fue consecuencia de que nuestros antepasados estaban afectados por un parásito especialmente desagradable.

Tengo la sensación que el tema de nuestro simposio todavía no puede denominarse ciencia en el sentido estricto de la

palabra, aunque esta observación no desmerece en absoluto la importancia de lo que discutimos.

Se trata de un problema con muchas facetas, que descansa sobre una hipótesis que parece bastante sostenible y esta hipótesis descansa en el supuesto de que entre los 10^{22} estrellas del universo observable hay algunas con sistemas planetarios, entre las cuales hay planetas capaces de sostener una vida inteligente.

El hecho de que una civilización altamente desarrollada pueda influir sobre el planeta que habita, puede ilustrarse mediante un ejemplo más bien sencillo. Es un ejemplo que di hace diez años y que parece haber alcanzado cierta popularidad. Es el hecho de que gracias al desarrollo de la televisión la temperatura de brillo de nuestro planeta en el intervalo de las ondas métricas ha pasado como promedio al orden de $10^{8°}$ K y eso hace que nuestro planeta sea sólo inferior en brillo al Sol en nuestro sistema solar. En algunas longitudes de onda el efecto puede ser todavía mayor; en algunas bandas estrechas utilizadas en estudios por radar de los planetas, el orden de magnitud de estas emisiones potentes es mucho mayor que la emisión del Sol.* Sin embargo, se trata de un efecto muy difícil de detectar a una distancia como la de la estrella más próxima, porque se trata de una emisión casi isotrópica en vez de dirigida. A 10 parsecs, el flujo de la emisión terrestre debido a la televisión sería de unos 10^{-37} vatios por metro cuadrado por megaherzio.

Podemos desde luego visualizar una civilización situada aproximadamente a nuestro nivel, pero disponiendo de una potencia todavía mayor. Sin embargo, creo que una civilización de este tipo no podría dar a conocer su existencia en la galaxia por estos medios, aunque ahora me refiero a emisiones isotrópicas y no al enfoque de señales, que discutiremos a continuación.

En los últimos años se ha generalizado la idea de que pueden existir civilizaciones que dispongan de recursos de potencia mucho mayores, civilizaciones llamadas de tipo II y de tipo III. Si me refiero no a señales enfocadas sino simplemente a la escucha de una emisión isotrópica, eso podría corresponder solamente a civilizaciones tan superiores que utilizaran energías del orden del 10^{30} o más ergios por segun-

* G. W. SWENSON y W. W. COCHRAN han informado sobre observaciones directas con temperaturas de brillo en el espectro radio de 4 000°K, desde los 73 a los 440 megaciclos, procedentes de ciudades aisladas de Illinois: «Radio Noise from Towns: Measured from an Airplane», *Science* 181, 1973, pp. 543-544. *(Nota del editor.)*

do, diez mil millones de veces superiores a la energía que está en nuestras manos.

Pero las condiciones y la estrategia de una tal civilización deben diferir desde luego radicalmente de la nuestra. Creo personalmente que el avance desde una civilización de tipo I a una civilización de tipo II implica la aparición de un nuevo factor en la ecuación (1), y ese factor puede ser descuidado por pequeño. Creo que estas civilizaciones tan extraordinariamente avanzadas no han de ser biológicas, sino más bien diseñadas por computadora y dispersas sobre zonas enormes. Incluso se empieza a comprender que la existencia de sistemas biológicos en unos ambientes que ofrecen tan enormes recursos de energía podría ser muy difícil.

En tal situación nos enfrentamos con perspectivas totalmente nuevas. Sólo las puedo citar brevemente. Por ejemplo, los peligros de la radiación, que pueden sernos fatales, allí carecerían de importancia, y estas civilizaciones podrían emitir radiaciones duras en longitudes de onda muy cortas.

Todas estas civilizaciones han de tener en común la reemisión de tanta energía como consumen. Este principio es básico, porque de otro modo la temperatura de tales civilizaciones se elevaría increíblemente, intolerablemente. Me gustaría oír la opinión de los especialistas sobre la siguiente pregunta: ¿Necesita un sistema de este tipo emitir necesariamente de acuerdo con la ley de Planck, o bien puede emitir energía de algún otro modo?

Además, esas civilizaciones no han de limitarse necesariamente a utilizar la energía de su estrella central. Por ejemplo, si se utilizara la energía de un planeta mayor, como Júpiter, se podrían producir energías de 10^{35} ergios por segundo –más de lo que produce el Sol– durante millones de años. Quizá para civilizaciones tan avanzadas el aprovechamiento de la energía de la estrella central pueda ser una idea demasiado primitiva e ingenua.

Me gustaría también subrayar que el desarrollo de tales civilizaciones avanzadas cibernéticas puede describirse como un lógico desarrollo abiológico de la vida que conocemos. Quizá lo que llamamos civilización sea, únicamente, un estadio intermedio en el camino hacia civilizaciones más avanzadas, un camino, además, intermedio e inestable.

Quisiera mencionar finalmente lo que a mi parecer constituye un tema muy importante. Si consideramos energías de emisión tan enormes como 10^{30} o 10^{35} ergios por segundo, y además energías que pueden estar en cualquier banda de ondas

arbitrariamente elegida y que son el producto de la actividad biológica de tales civilizaciones, se nos plantea una cuestión: ¿Cómo podremos distinguir una señal así de una señal natural? Este problema parece elemental, pero es realmente formidable. Podría presentar unos cuantos ejemplos de recientes observaciones astronómicas o avances que al principio nos hicieron creer que estábamos observando lo que denominamos un milagro cósmico; pero ese milagro, tras un examen más a fondo, resultó ser un fenómeno perfectamente natural. Por lo tanto, el criterio sobre la naturaleza artificial de tales señales se convierte en uno de nuestros mayores problemas, y confío que se discuta aquí.

Me gustaría concluir diciendo que en las investigaciones de este tipo, debemos seguir el principio legal de suponer que las señales son naturales mientras no se demuestre lo contrario.

PLATT: ¿Es posible que CETI determine la L –de la ecuación (1)–? Las civilizaciones avanzadas quizás actúen como los padres que no hablan con el bebé hasta que el bebé no se ha despertado. En este caso no podemos formular ninguna estimación. Aquí en la Tierra nos encontramos en una gran línea divisoria, en una transformación mundial. En los últimos cien años hemos aumentado nuestra velocidad de comunicación por un factor de 10^7, nuestra velocidad de viaje por 10^2, nuestros recursos energéticos por 10^3, nuestras armas por 10^6, nuestras velocidades de tratamiento de datos por 10^6.

Algunas de estas transformaciones, como la radio, han sido repentinas. Otras, más graduales. Algunas, como la población, son más bien lentas, pero en conjunto muchas de ellas se aproximan a algunos límites naturales. No podemos comunicar más rápido que la velocidad de la luz ni viajar alrededor de la Tierra a una velocidad superior a la velocidad orbital, o aumentar nuestra energía por encima de la polución térmica que amenaza ahora a Los Ángeles; y en cuanto a las armas no se puede estar más muerto que un muerto.

El tratamiento de datos puede aumentar por otro factor de 100, pero en conjunto nos hallamos en un período de transición en una escala que no ha conocido ninguna sociedad. Ninguna de nuestras organizaciones sociales está preparada para enfrentarse con cambios de tal magnitud. El resultado es que podemos oscilar, o podemos destruirnos o podemos alcanzar una situación estática a un nivel elevado.

Para sobrevivir tendrá que ser en una nueva forma de sociedad, totalmente diferente de todo lo que ha existido antes

en el mundo, tan radicalmente diferente como una nueva especie.

Las catástrofes incluyen la destrucción nuclear, la polución, la disrupción ecológica, el exceso de población, y el agotamiento de los recursos naturales. Más de la mitad de nuestros minerales críticos se habrá agotado en veinte años. La semivida estimada por Leo Szilard para la aniquilación nuclear fue de diez a veinte años si continuábamos disponiendo cada año de más armas nucleares que conducirían a enfrentamientos nucleares y a posibles accidentes.

Creo que lo que se necesita son dos factores que determinen si podemos pasar a un nivel superior de organización o si nos borramos a nosotros mismos. El primero es una comprensión de la resolución de conflictos. Como enseñan los libros de John Burton sobre *Comunicación y conflicto* y las obras de Anatole Rapaport sobre la teoría de juegos de suma no nula, nuestros problemas más peligrosos, muchos de ellos, están en la zona de los juegos de suma no nula. Se trata de casos en los que una conducta individualmente racional produce, sin embargo, la destrucción colectiva. Se trata de un racionalismo estrecho. Las obras de Rapaport se titulan: *Teoría del juego de dos personas* y *El dilema del prisionero,* y podría añadir otro llamado *Los dos grandes.* Ya pueden imaginar quiénes son esos «dos grandes».

La segunda necesidad es el análisis de sistemas de estos problemas que se influyen mutuamente, porque su interacción los hace a todos más peligrosos. Jay Forrester, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, ha dado el primer paso en análisis de sistemas con su obra *Dinámica mundial.* Lleva a cabo simulaciones en computadora de la población, disponibilidades alimentarias, polución, consumo de recursos naturales, inversión en capital, etc. Cada uno de los factores tiene un efecto sobre los demás.

Supone unas constantes de acoplamiento que pueden estar equivocadas, pero el resultado es la posibilidad de simular la continuación en el futuro del aumento de la polución, cómo los alimentos irán por detrás de la población, cómo los recursos naturales pueden ser utilizados más violentamente. El resultado pueden ser repentinas catástrofes de la población. La época y la magnitud de estas catástrofes dependen de las decisiones que tomemos; una época típica para su catástrofe de población es el año 2020. Este trabajo puede estar equivocado, pero constituye un primer paso: es importante que los demás consigan resultados mejores que ese primer paso.

Volvamos ahora a la inteligencia no local. Creo que la duración de las sociedades extraterrestres puede depender de una carrera entre la cooperación y la competición. Se necesita cooperación para desarrollar el lenguaje, la comunicación simbólica entre individuos, mientras que la competición puede ser necesaria, como sugiere el doctor Gold, para un desarrollo tecnológico rápido.

Puedo imaginar tres tipos de sociedades: primero, una que ha resuelto sus problemas de organización social antes de llegar a la alta tecnología. Ésta podría ser una sociedad de animales muy dóciles o de animales muy dependientes, o podría ser una sociedad de termes.

El segundo tipo sería una sociedad que también resuelve la organización social por accidente, como el de un dictador nuclear, del tipo de Hitler. Si hubiese dispuesto de la bomba atómica, habría borrado a todos los que se le hubiesen resistido en el mundo, pero la sociedad podría haber continuado y además con una alta tecnología.

El tercer caso es el nuestro. En él el problema de la organización social o del conflicto no se ha resuelto antes que el tecnológico; creo, pues, que debemos pasar ahora a una discusión probabilística. Creo que este problema es de umbral y no un problema de vida media.

Muchas sociedades pueden resultar destruidas, pueden destruirse a sí mismas antes de resolver este problema, pero una fracción de ellas puede resolver el problema y sobrevivir hasta dar con el problema siguiente, y por lo tanto uno de esos problemas puede ser el agotamiento de los recursos antes del despegue tecnológico. Un problema podría ser la resolución de los conflictos antes de la autoeliminación. Un problema podría ser la pérdida de interés. Estas sociedades podrían dedicarse a la religión interior, como el budismo zen, subrayando lo de aquí y lo de ahora. Creo que cada uno de estos umbrales causará la pérdida de algunas ETI, quizá por las drogas, quizá por una degeneración genética que ahora no comprendemos. Sin embargo, un pequeño número de sociedades –¿quién sabe si un uno por ciento?– podría encontrar la manera de resolver estos sucesivos problemas y sobrevivir: ¿sobrevivir diez millones de años, 10 000 millones de años?

Creo que no conocemos las posibilidades de cualquiera de estas situaciones. Podemos decir algo sobre los problemas inmediatos de la Tierra, pero creo que nos resultará muy duro prever los tipos de problemas con que se enfrentará la nueva sociedad.

Mi conclusión es que 50 años $< L <$ 1 millón de años. Pero L podría ser 5 años.

BRAUDE: Doctor Platt: cuando habla del fin de nuestra civilización y cuando lo presenta mediante una curva que finaliza el año 2020, ¿cuál es la estabilidad de esa curva? ¿Hay que cambiar mucho los parámetros para que, por ejemplo, se aleje en el tiempo o para que la curva suba?

PLATT: La sociedad no se puede predecir como se hace con la física, porque se trata de un sistema cibernético, como la conducción de un automóvil, y el resultado es que la catástrofe se producirá si no hacemos nada ahora. Forrester ha computado por lo menos veinte conjuntos de curvas con supuestos diferentes: sobre nuestro control de la polución, sobre nuestro control del índice de natalidad, sobre nuestra inversión de capital en agricultura, y estas curvas conducen a catástrofes en épocas diferentes y con magnitudes diferentes; tiene incluso un conjunto de curvas que desembocan en una situación estática, que, por contraste, parece muy agradable.

BRAUDE: ¿Y qué dice sobre un cambio insignificante en los parámetros sobre los que se basan las curvas? ¿Se mantienen estáticas las curvas en este caso?

PLATT: Uno de los resultados interesantes del estudio de Forrester es que algunos parámetros son relativamente poco importantes. Por ejemplo, el nivel absoluto de población importa poco que sea de 4 000 o de 6 000 millones, o quizá desplaza sólo en cinco años la época de la catástrofe.

Por otra parte hay constantes de acoplamiento que probablemente son sensibles a una quinta parte de un uno por ciento, y éste es el tipo de análisis que permitirá identificar los parámetros sensibles sobre los cuales debemos actuar.

STENT: Pienso también como el doctor Platt que la condición humana está a punto de experimentar un cambio radical. Llamo a esta nueva condición la Edad de Oro. En esa Edad de Oro los problemas que aparecieron cuando el hombre, como señaló el doctor Lee, abandonó su condición de feliz cazador para civilizarse, estarán a punto de resolverse. Por lo tanto soy optimista.

He formulado estas ideas en una pequeña obra titulada *La llegada de la Edad de Oro*, donde traté de demostrar que el rasgo más característico de esta nueva condición humana es la desaparición de la creatividad del escenario humano. La historia pasada y el estado actual de las dos manifestaciones más importantes de creatividad, a saber las artes y las ciencias, demuestran, en mi formulación, que estas dos actividades están alcanzando su feliz final. Desarrollé este argumento sobre un frente en mi opinión bastante amplio, y aquí apenas puedo dar un esbozo de mis ideas.

La única parte de mi argumento que quiero discutir aquí resulta tener importancia en la estimación del factor L en la ecuación (1) y es de tipo psicológico. Porque estoy convencido de que el progreso, que es el fruto de la creatividad, incorpora en su interior una contradicción psicológica intrínseca. Me refiero con la palabra progreso precisamente al tipo de progreso que nos ocupa, a saber, la consecución de un dominio mayor sobre la naturaleza. Por lo tanto, en una época t_2 ha habido progreso si el dominio actual sobre la naturaleza es superior al de una época anterior t_1. Para esta noción de progreso sólo tienen importancia parámetros prácticos como la energía consumida per cápita, o la velocidad de transporte o el producto nacional bruto. Se trata, por lo tanto, de un concepto esencialmente amoral y no tiene nada que ver con aspectos afectivos de la felicidad humana.

Mi punto de partida para este argumento consiste en reconocer que existe un rasgo del carácter humano que impulsa a la gente a ejercer el poder sobre la naturaleza, que le hace desear la manipulación de su medio ambiente. Este rasgo fue llamado por Nietzsche «voluntad de poder», aunque él lo utilizó en parte como un concepto metafísico, como la esencia misma de la vida. Yo considero únicamente la voluntad de poder como un atributo psicológico que aparece en la infancia como cualquier otro rasgo, a consecuencia de una dialéctica entre el desarrollo del cerebro y las condiciones del medio ambiente. Creo que la inseguridad económica es un ingrediente esencial en el medio ambiente para la evocación de la voluntad de poder en esta dialéctica durante la infancia entre naturaleza y alimento. Es decir, que cuando el niño es lo bastante grande para ser consciente de la situación exterior, se le hace comprender que si no se esfuerza y lucha contra la naturaleza y trata de dominarla, no sobrevivirá económicamente, es decir, que morirá de hambre. Es la voluntad de poder lo que hizo que el hombre inventara la civilización hace diez mil años.

Pero con la aparición de la civilización, como explicaron

Lee y Flannery, y especialmente con la aparición del primer excedente económico, fue posible sublimar esta voluntad de poder a esferas superiores más allá del concepto de la supervivencia diaria, más allá de la lucha por la siguiente comida. Apareció eventualmente una forma extrema de la voluntad sublimada de poder, que se había llegado a divorciar casi completamente de la actividad económica, un psicotipo que algunos filósofos alemanes de los siglos XIX y XX han denominado el hombre fáustico. El hombre fáustico es la encarnación de la extrema voluntad de poder. Su idea del mundo es de una lucha constante. Y puesto que considera esta lucha como la esencia misma de su existencia, el hombre fáustico no está nunca satisfecho. Él es irónicamente aquel tipo ideal en quien pensaban los economistas del siglo XIX con su idea del hombre económico. Y el hombre fáustico se convirtió en la fuente principal de progreso. Es decir, que al no estar nunca satisfecho está siempre luchando, está empujando siempre hacia adelante, está tratando de conseguir un dominio mayor sobre la naturaleza aunque de hecho su situación personal es económicamente segura.

Y ahora llegamos a la contradicción: a medida que los esfuerzos del hombre fáustico tienen éxito, que el progreso se desenvuelve, que se consigue una seguridad económica general mayor, aparece un medio ambiente infantil en el cual la evocación en el niño de la voluntad de poder ya no es el producto normal ontogenético de la infancia. Es decir, aparecen adultos en los cuales la voluntad de poder ya no es el rasgo de carácter dominante. Uno de los primeros casos identificables del declinar de la voluntad de poder se dio en el siglo VII en la China de la dinastía Tang, donde se había conseguido un grado de seguridad económica, de ley y de orden, de progreso cultural –tanto artístico como tecnológico– que superó todo lo visto antes sobre la Tierra. En esa época se hizo popular en el Reino del Centro una idea filosófica esencialmente antifáustica que buscaba la armonía en lugar del dominio sobre la naturaleza. Considero significativo que la primera aceptación masiva de esta idea se diese en el primer ambiente general de seguridad económica.

En el remanso cultural europeo este desarrollo no se dio hasta la Revolución industrial, y creo que no es una casualidad que el Romanticismo, la apoteosis occidental (y principalmente germánica) del hombre fáustico, empezara a declinar a mediados del siglo XIX. Desde entonces, la disminución de la voluntad de poder ha seguido a buen ritmo y con ella se ha

producido la salida gradual del hombre fáustico del escenario de la historia, hasta que en la llamada sociedad de la abundancia, y tras algunos altibajos, esta evolución caracterológica se ha convertido en un rasgo muy pronunciado de la vida diaria.

Por lo tanto, la contradicción inherente al progreso, y autolimitadora, que he intentado exponer aquí es que el desenvolvimiento del progreso actúa contra la perpetuación de la fuerza psicológica necesaria para impulsarlo.

Otro ejemplo histórico que ilustra las consecuencias de esta contradicción que deseo presentarles es el caso de la Polinesia. En este caso la seguridad económica general no se consiguió gracias a una tecnología avanzada, sino simplemente porque un pueblo marítimo aventurero y valiente logró encontrar un paraíso en la Tierra, donde una naturaleza abundante proporcionaba entonces para todos lo que una tecnología de alto nivel está finalmente a punto de proporcionar o ha proporcionado ya a muchas gentes de otros lugares. Cuando los primeros europeos llegaron como intrusos, en aquel escenario la personalidad polinesia había experimentado un cambio profundo desde la de sus antepasados exploradores-colonizadores, y el hombre fáustico había desaparecido de los mares del Sur. Creo que el estado de la sociedad característico de Polinesia es un estado que podemos prever para el futuro en las naciones industriales.

Por lo tanto, si este argumento sobre la autolimitación psicológica del progreso tiene algún mérito y si además tiene alguna validez cósmica (quizá no) se deduciría que el factor L es bastante pequeño, es decir, que la duración de las sociedades tecnológicamente competentes elegibles para CETI es muy corta. Porque es probable que su tecnología avanzada proporcione también a otros seres inteligentes la misma seguridad económica que la nuestra nos está proporcionando. Y si sus cerebros se nos parecen (lo que, desde luego, puede no ser cierto), entonces todas esas sociedades avanzadas constituirían un archipiélago polinesio en la Galaxia cuyos moradores estén preocupados principalmente por su vida interior y no les interese comunicar con seres de otros sistemas planetarios, especialmente con nosotros.

PLATT: ¿No podría darse una situación realimentada con una generación interesada, la siguiente desinteresada y la otra interesada de nuevo? Me parece que sería una situación estabilizada.

STENT: No considero muy crítica para mi argumento la cuestión de las oscilaciones. Por ejemplo, y tomando la posibilidad más extrema, si hubiera un holocausto nuclear aquí en el futuro próximo y sobrevivieran sólo unas pocas personas, se produciría efectivamente una caída dramática en el nivel de la civilización y desaparecería la sociedad de la abundancia. Pero según la cantidad de personas, la cantidad de conocimiento y la cantidad de equipo que sobreviviese, los supervivientes podrían escalar de nuevo y probablemente en mucho menos tiempo que los 10 000 años que se necesitaron para alcanzar por primera vez la seguridad económica.

En cuanto a otras causas posibles para una disminución de la abundancia, me parece que el efecto negativo de la seguridad económica en el ambiente del niño sobre el desarrollo de la voluntad de poder, exigiría reducciones más bien severas en el nivel de vida entre generaciones para que la voluntad de poder pudiera recuperar su anterior hegemonía; pero, en todo caso, mi idea principal es que se alcanzará algún tipo de situación estable no fáustica en algún nivel elevado de tecnología, que es también lo que dice el doctor Platt.

BURKE: Me gustaría dirigirme con una nota de optimismo al blando Apocalipsis que ha planteado el doctor Stent. Creo que se acepta generalmente que los acontecimientos liminares en la tecnología dependen de las actividades de sólo unas cuantas personas y la mayoría de sociedades toleran un intervalo bastante amplio de conductas entre sus miembros aunque, desde luego, esto no es siempre cierto. Por ejemplo, nuestra sociedad actual consta en su mayor parte de gente productora de bienes útiles, pero también permite que unos cuantos académicos discutan temas abstrusos. Por lo tanto, no veo que una sociedad compuesta principalmente de gente que no hace nada no nos permitiera los mismos placeres y que de hecho no nos permita las mismas herramientas para que hagamos lo que queramos.

STENT: Lamento no haberme expresado, al parecer, más claramente. Mi argumento no se refería a la cuestión de desautorizar las libertades individuales o las herramientas para cualquier actividad en el futuro, ni tampoco pronostiqué que pronto se vaya a prohibir a las personas creativas ejercer su creatividad. Mi argumento era que las nuevas condiciones del ambiente infantil no favorecen el desarrollo de los tipos de personalidad a partir de los cuales y al hacerse mayores se reclutan

los pocos individuos creadores sobre cuyas actividades dependen los acontecimientos que hacen época en la tecnología. La creatividad, o la intensidad de la voluntad de poder, está distribuida en cualquier población, y, siguiendo el comentario del doctor Burke, los pocos individuos altamente creativos forman la punta estrecha de una pirámide abrupta con una amplia base. Mi argumento es, por lo tanto, que la distribución de la creatividad cambiará radicalmente, tendrá el aspecto de una pirámide chata con una separación mucho menor entre la punta y la base. Esto sucederá a consecuencia del cambio en el ambiente infantil, y no a consecuencia de actos represivos en los que una mayoría reprime a una minoría.

BURKE: ¿No habrá una distribución de tales ambientes?

MORRISON: ¿Nadie cometerá errores?

STENT: Sí. Pero creo que la distribución se desplazará sólo ligeramente.

MINSKY: Estoy muy de acuerdo con el espíritu de las observaciones del doctor Shklovsky. Creo que dentro de ochenta o de cien años tendremos la capacidad para construir máquinas de una enorme inteligencia. Creo que éste es un factor que no entra en los modelos del doctor Stent ni del doctor Forrester; es decir, que uno de los nuevos rasgos de la situación es la inteligencia, que probablemente va a aumentar en un factor de 10^4 o de 10^5 en ese mismo período.

Como el doctor Shklovsky ha indicado, el paso a lo mecánico tiene sus ventajas. Uno tiene apego sentimental a su caparazón biológico y muchas personas que son culturalmente conservadoras desearán quedarse en sus cuerpos, por sus diversas y bien conocidas ventajas. Pero habrá otros que se sentirán intrigados por la posibilidad de unas cuantas mejoras, como la inmortalidad, una inteligencia colosal, la capacidad de experimentar un ámbito más amplio de fenómenos abstractos y concretos que superan el alcance de los humanos. Creo que toda raza que alcanza el tipo de punto crítico tecnológico en que nos encontramos actualmente, tendrá que tomar una decisión que puede ser muy bien una decisión entre la horrorosa Edad de Oro del doctor Stent, basada en una teoría psicológica del poder, increíblemente primitiva en comparación con cualquier otra de las teorías psicológicas que uno pudiera inventar.

La posibilidad que yo contemplo y que el doctor Shklovsky contempla es que una sociedad tecnológica pueda convertirse a sí misma en una especie formada por seres pequeños y

poderosos que quizá sean lo bastante duraderos para sus propios viajes interestelares y lo bastante tecnológicos para aprovechar la energía de un Sol o de un planeta mayor.

Pienso ahora que diez minutos es un tiempo demasiado breve para explicar cómo se producirá todo esto, y además tampoco lo sé exactamente. En cierto modo mi postura se parece a la de un exobiólogo, a saber, que mi campo es el de la inteligencia artificial y a menudo un público reacciona del mismo modo con un exobiólogo (cfr. apéndice B) y le replica: «Usted está estudiando un campo que no existe.» Pero en los últimos quince años hemos conseguido una mejora en la inteligencia de nuestras computadoras con un factor de 10^6, y me limitaré a hacer con ustedes una jugada de póquer y decirles que dispongo de algunas pruebas sobre la existencia de inteligencia artificial: se trata de la disertación doctoral de Terry Winograd en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, sobre la cual hablaré después. Vemos ahí un programa de computadora que presenta una fracción pequeña, pero perceptible, de la inteligencia humana.

MORRISON: ¿Cuál es esa fracción?

MINSKY: Creo que la fracción está comprendida entre una parte en 10^6 y una parte en 10. No puedo imaginar que sean precisos 10^{12} bits para contener un ser superinteligente de este tipo. Tampoco puedo concebir que quede todavía por realizar cien veces la labor ya realizada.

No puedo prever cuánto se tardará, porque el tiempo preciso para la ejecución de grandes proyectos tecnológicos depende del entusiasmo de la sociedad. En una o dos décadas la posibilidad de una inteligencia artificial será lo bastante visible para que la sociedad tenga que decidir si quiere impulsarla hacia adelante, como sucedió en el caso del espacio. No estoy seguro sobre el significado de ello para la comunicación interestelar, pero creo que yo diría lo mismo que el doctor Shklovsky si pensara más sobre el tema.

GOLD: Me gustaría referirme a la posibilidad de otra fase en la revolución tecnológica de nuestro tiempo que cambiaría de un modo substancial parte de la discusión, no toda. Todo el mundo se preocupa mucho por el desarrollo de la maquinaria computadora, y no hay duda de que se trata de algo muy importante, pero uno tendría que pensar en el simple desarrollo de máquinas muy grandes y poderosas, máquinas mecánicas de tamaño y potencia enormes.

Actualmente la escala de la maquinaria que tratamos está determinada todavía por el cerebro humano. Todavía no estamos separados del cerebro por una generación entera de máquinas. Construimos maquinaria, como automóviles o máquinas de construcción de carreteras o lo que sea, a una escala que se relaciona todavía con nuestro armazón humano por algún intermedio u otro. Apenas nos hemos separado de él. Esta maquinaria la han de montar personas o la montan actualmente personas, o se construye con fines relacionados con el armazón humano, como el automóvil.

Pero cuando haya transcurrido cierto tiempo, probablemente nos liberaremos de esta restricción y ampliaremos la escala de nuestra maquinaria. Cuando emprendamos esta dirección, creo que podremos proceder inmediatamente en grande. Porque si uno puede construir una máquina mucho mayor, puede también excavar minerales y construir otra maquinaria mucho mayor para la producción de metales y para cada fase de la producción de las mismas máquinas. Esta situación presenta una realimentación muy positiva, y cuando despeguemos en esta dirección llegaremos muy lejos.

Esto me hace pensar que podríamos imaginar posibilidades de construcción a escalas que por ahora no podemos ni siquiera soñar. Su principal justificación sería inicialmente en beneficio del asentamiento humano, como en el transporte de agua a distancias realmente grandes: trasladar el Mississippi a California, si les parece, o cualquier otra cosa, porque uno dispondría de máquinas excavadoras de estas dimensiones. Pero también permitiría la búsqueda de minerales en el subsuelo: no en los primeros dos o tres kilómetros de la corteza terrestre, sino en los primeros 60 kilómetros de esta corteza: sería posible excavar agujeros de esta escala.

Como es lógico, eso cambia totalmente la discusión que hemos mantenido en relación a los recursos. Conozco la naturaleza de la función exponencial a que Platt se refería, y unos términos así lo cambian todo en unos dos años. Sin embargo, las máquinas gigantes lo cambian a lo grande; por de pronto uno dispone si así lo desea de 60 kilómetros de suelo por arar. Esto cambia completamente, por ejemplo, la cuestión de la polución, porque se desarrollan nuevos métodos para evitarla. Cambia completamente la cuestión del suministro de alimentos, porque no hay duda de que en esa era de grandes maquinarias, serán posibles los alimentos artificiales de todo tipo.

Creo que deberíamos contemplar grandes cambios. En rea-

lidad me sorprende que todavía no hayamos avanzado más en este sentido. Pero cuando llegue el momento, en lugar de las complicaciones, deberíamos pensar en el tipo de capacidades que adquiriríamos.

MINSKY: Me gustaría añadir a la observación del doctor Gold la posibilidad de máquinas muy pequeñas, que en mi opinión comenzarán a existir también en la siguiente década. Nuestro laboratorio está trabajando en ellas. Estas máquinas implican el mismo tipo de extensión: por ejemplo, en relación con la energía podríamos fabricar kilómetros cuadrados de pequeñas células solares, unos aparatos muy delicados.

Una de las principales objeciones ha sido la cuestión de mantenerlas limpias, pero se podrían desarrollar máquinas pequeñas, como insectos, que corrieran sobre su superficie y las limpiaran y repararan, y creo que Tom Gold ha estado muy acertado al decir que la polución y otras crisis mencionadas aquí pueden tratarse mejor mediante una expansión tecnológica agresiva.

EL NÚMERO DE CIVILIZACIONES GALÁCTICAS AVANZADAS

N

SAGAN: Me gustaría sacar algunas conclusiones de la ecuación (1) y de las deliberaciones llevadas a cabo hasta el momento en nuestro debate. Nos ha parecido que algunos factores los conocíamos relativamente bien; otros, muy defectuosamente. Pongamos los números de que hablamos y veamos cuáles son sus implicaciones. Hemos citado explícitamente un valor de R_*, la velocidad media de formación estelar durante toda la vida de la Galaxia: aproximadamente 10 por año.

Parece deducirse de la presentación del doctor Gold que la fracción de estrellas con planetas, f_p, es del orden de la unidad, quizás una mitad, un tercio, un cuarto, algo así.

Yo traté de hablar en mi exposición del número de planetas por sistema solar en los que las condiciones no son tan severas que excluyan la vida. Yo diría que este número es más o menos la unidad. No hay duda de que en nuestro sistema solar hay varios. Hay por lo menos algunos indicios de que las estrellas de la serie principal intrínsecamente menos brillantes tienen sus planetas más próximos que los de nuestro sistema solar. Y estas estrellas son más viejas que el Sol y dan un margen mayor para la evolución biológica en sus planetas.

Lo que hemos estado debatiendo con mayor vigor ha sido el producto de f_l, f_i y f_c, la probabilidad de la emergencia secuencial de la vida, la inteligencia y la tecnología avanzada. Fue ahí donde se planteó de modo más agudo la contraposición entre probabilidad subjetiva y probabilidad estadística. Los doctores Crick y Orgel pensaban que f_l podría acercarse a uno, pero que las incertidumbres eran tan grandes que su valor podría ser mucho menor. Por otra parte sugirieron que f_c muy probablemente sea 1. El doctor Platt y yo opinamos con algo más de confianza que el valor de f_l podría ser cercano a la unidad, pero el doctor Platt y quizás el doctor Lee estaban

preocupados por la idea que la evolución del lenguaje y la domesticación del fuego pudieran ser lo bastante improbables para que f_c resultara pequeño. Los doctores Minsky y Hubel han discutido el número de unidades neurales elementales necesarias para que f_i esté próximo a la unidad: no parece que sea muy grande y las ventajas selectivas de la inteligencia son enormes. Hemos intentado distinguir claramente entre la probabilidad del desarrollo humano y la probabilidad del desarrollo de un ser muy diferente, que en lo intelectual le sea equivalente o superior. Hemos intentado también subrayar los factores todavía poco estudiados en los que el tiempo de su aparición pueda exceder el tiempo disponible. El intervalo máximo para todas las estimaciones del producto $f_l f_i f_c$ va desde la unidad hasta una fracción muy pequeña. Si aplico mi sentido de los promedios, la estimación de esta probabilidad subjetiva por parte de los participantes en el simposio es 10^{-2}.

Si introducimos estos números (y desde luego tenemos libertad para poner los números que queramos), vemos que el número de civilizaciones existentes en la Galaxia es de $10^{-1} \times L$, donde L está medido en años. Esto significa por lo pronto que aunque no estimamos la duración de una civilización media, hemos estimado la velocidad de formación de estas civilizaciones en la Galaxia: se forma una cada diez años.

Si hablamos de civilizaciones tecnológicas capaces de un contacto interestelar, nuestra edad es de sólo unos cuantos decenios, por lo tanto, incluso bajo esos supuestos que quizás algunos calificarían de optimistas, nos vemos obligados a admitir que ninguna civilización en la Galaxia con la cual podamos comunicar es menos avanzada que la nuestra. Todas las demás civilizaciones comunicativas tendrán que estar bastante más avanzadas que nosotros. Creo que se trata de un punto con implicaciones muy serias en cuanto a la cuestión del contacto se refiere, y a ello volveré después (apéndice C). Recalco que es independiente de nuestra estimación de la duración media de las civilizaciones galácticas.

Finalmente N depende de lo que escojamos para L. Recordemos que L es un promedio muy basto de la duración de todas las civilizaciones en la Galaxia. El doctor Platt ha propuesto la idea, como hicieron otros, de que sólo una pequeña fracción, quizás el uno por ciento, de las civilizaciones resuelven los problemas que acosan a nuestra época, pero que esas civilizaciones disfrutan de vidas muy largas. Los problemas que acosan a las sociedades emergentes como la nuestra se resolverán con una tecnología muy avanzada, así lo recalcaron

los doctores Shklovsky, Dyson, Minsky y otros. Estas sociedades quizá no se limiten a los planetas donde nacieron. Si estas sociedades, estabilizadas contra la autodestrucción o la pérdida de interés, alcanzan escalas de tiempo geológicas o estelares, eso implicaría que el valor adecuado para L es de $10^{-2} \times 10^9$ años, o sea, 10^7. La conclusión para los valores elegidos en la ecuación (1) sería entonces $N \sim 10^6$: hay un millón de civilizaciones técnicas en la Galaxia. Esto corresponde de aproximadamente a una entre cada mil estrellas. Si suponemos que estas civilizaciones están distribuidas al azar, la distancia a la más próxima es de unos cuantos centenares de años-luz. Si los valores son de este tipo, estas civilizaciones, longevas y muy avanzadas, dominan a fondo el panorama.

Pero todos nuestros argumentos en relación al valor de $f_l f_i f_c$ palidecen ante las incertidumbres de L.

Si suponemos un panorama pesimista, del mismo modo que la lectura de los periódicos no siempre nos quita las ganas de continuar haciéndolo, podríamos suponer que L como promedio es de décadas. En este caso la ecuación (1), como ven, implica que el número de civilizaciones técnicas en la Galaxia es de uno: la nuestra. Si las civilizaciones se destruyen poco después de aparecer, no habrá nadie con quien hablar, sólo con nosotros mismos.

MAROV: El doctor Minsky habló de la inevitabilidad de la transformación en seres tecnológicos y de la inevitabilidad de una elección entre la Edad de Oro del doctor Stent y una transición a unos seres tecnológicos relativamente escasos pero altamente organizados. El doctor Lee habló sobre la evolución de la inteligencia en la Tierra, de la línea de desarrollo que condujo hasta el hombre que conocemos hoy en día. Estamos hablando, pues, de una cierta tendencia en el desarrollo de la civilización, en la evolución del *Homo sapiens*. Sin embargo no se ha dicho nada aquí sobre la posibilidad de que el hombre haya alcanzado actualmente sus límites, los límites de su desarrollo, mental y físico, por ejemplo, desde el punto de vista de las posibilidades de su cerebro para almacenar mucha más información, para transformarla de una manera óptima, en un tiempo limitado, etc.

Sería interesante conocer si los antropólogos excluyen al final de esta línea de desarrollo del intelecto la posibilidad de un estadio cualitativamente nuevo en el desarrollo humano. Sólo podemos especular sobre el número de ramas anteriores en el desarrollo humano que fueron ciegas, es decir, que no

dieron una especie estable: si se trataba de callejones sin salida. Posiblemente el desarrollo de un ser biológicamente inteligente como el hombre actual desembocará también en un callejón sin salida y cederá el paso a lo que dijo el doctor Minsky, una nueva rama en el desarrollo de una civilización altamente avanzada en lo tecnológico (aunque la humanidad evite catástrofes como un holocausto nuclear, la polución, etc.). Pero yo me pregunto si el concepto del desarrollo de seres tecnológicamente inteligentes resuelve algunos de los problemas que afectan a los seres biológicamente inteligentes. ¿No podrían incluso las computadoras de la cuarta generación, actualmente esperadas, acercarse a una red tan altamente desarrollada de conexiones lógicas que adquirieran las limitaciones inherentes al hombre actual: por ejemplo, contradicciones como la ambición, la codicia, la envidia? Como ejemplo me podría referir ahora a una situación muy concluyente en una interacción entre computadora y astronauta esbozada por A. C. Clarke en su *2001: Una odisea del espacio*. La esperada autoproducción de máquinas altamente eficientes y los avances tecnológicos constituyen un remedio muy pobre a todos nuestros problemas de CETI. Otra posible tendencia en una tal autoproducción podría ser la degradación y el paso a una sociedad de robots. Imaginemos, para que quede claro, que tenemos una colección de robots decididos a mejorarse a sí mismos. En este grupo se dan intentos para resolver algunos problemas matemáticos y lógicos con vistas a la automejora y a los métodos de autorreproducción, de modo que quien se desenvuelva de la peor manera será desmontado y montado de nuevo de un modo más perfecto. Sin embargo es evidente que si estamos tratando con un ser lo bastante bien organizado (tecnológicamente), habrá de desarrollar un conjunto de capacidades mentales correspondientes, por ejemplo, a los intereses de autoconservación. Esto podría originar evidentemente cierta élite que se preocupara de desmontar y volver a montar las unidades del mismo nivel o de un nivel inferior para preservar su propio poder. Yo llamaría a esto algo así como jingoísmo de robot. En las fantasías de la ciencia-ficción se han utilizado (y con razón) situaciones semejantes.

Me gustaría decir a cuenta de esto que nuestra evaluación de L como 10^7 años me parece una estimación plausible, pero más bien optimista. Debería añadir, sin embargo, que tanto las tendencias progresivas como las regresivas parecen ser intrínsecas en una sociedad inteligente, y que, por lo tanto, el actual nivel de su desarrollo podría pasar por diversas fases. Entonces las transformaciones biológicas o la transformación de seres tecnológicamente inteligentes se presentarían como un proceso de desarrollo de la civilización según líneas pulsantes, desde un estado de declive a un estado floreciente. Si aplicamos esto a la ecuación (1) para estimar N en una zona limitada, en una región limitada del universo donde estamos llevando a cabo nuestra búsqueda, tendremos que introducir probablemente un factor que tenga en cuenta el carácter pulsante de la evolución de la civilización.

LEE: Quiero discutir algunos aspectos de lo que podría denominarse libremente SCETI, la Sociología de la comunicación con inteligencias extraterrestres, especialmente el problema de la inestabilidad, y las cuestiones extraordinariamente complicadas de la difusión y evolución de los contactos. Estas cuestiones pueden tener repercusión sobre los valores que asignemos en la ecuación (1).

Consideremos L, f_c y sus efectos sobre N, el número de civilizaciones técnicas. Tenemos muchas dificultades para estimar la magnitud de L. Las estimaciones varían desde menos de 10^2 a más de 10^9 años. Tenemos una L corta, una L larga y una L cíclica de una civilización que crece y mengua, perdiendo y ganando de nuevo el interés por la comunicación a través del tiempo.

Esta dificultad no debería sorprendernos porque ya hemos dicho que la inteligencia es una adaptación inestable. El problema de la inestabilidad puede ilustrarse con los siguientes hechos: durante 4×10^9 años en el desarrollo de la vida, las cosas iban correctamente; durante 2×10^6 años las cosas parecía que iban correctamente; pero tras sólo veintiséis años de civilización técnica atómica hemos llegado ya muy cerca de la destrucción.

¿Cómo podemos meter mano a este problema? Una solución consiste en imaginar varios ambientes planetarios y las velocidades de crecimiento de las formas de vida que pueden existir en ellos. Las velocidades de crecimiento podrían medirse por el número de nuevas especies que aparecen por millón de años de evolución. Una atmósfera rica permitirá más intentos o más especies que una atmósfera pobre o un medio ambiente pobre.

Esta perspectiva plantea la posibilidad de un ambiente planetario que fomente *demasiado* la evolución o bien que la retrase. Cuando buscamos vida en otros mundos, tendemos a pensar en función de las condiciones mínimas, de los límites

inferiores para el desarrollo de la vida. También deberíamos pensar en las condiciones máximas. Puede haber un número de ambientes que sean tan ricos que las especies florezcan rápidamente en ellos y desaparezcan.

Recuerdo una frase elocuente del profesor Shklovsky cuando hablaba de una civilización que vive y muere en el espacio de un día, como una mariposa. Hay algunos indicios de que nuestro planeta podría ser un caso así. ¿Es posible que la existencia de combustibles fósiles y nuestra explotación de ellos durante la Revolución industrial nos ayudara a alcanzar demasiado rápidamente el punto de despegue, mucho antes de que la organización social tuviera la oportunidad de desarrollar los frenos necesarios a las fuerzas destructivas? En esta perspectiva, una inestabilidad puede volver a definirse en función de un crecimiento explosivo y al menos podemos visualizar aquí que las condiciones para la vida están sobre una curva de distribución normal con unas condiciones óptimas situadas en alguna parte del centro. Debajo del mínimo no se da la vida; por encima del máximo la vida se extiende demasiado rápidamente y se derrumba sobre sí misma.

Hay otro importante factor adicional que puede tener repercusión en la ecuación (1), y es el de la difusión. Nuestra experiencia terrestre nos presenta la difusión con un tremendo impulso, es decir, la expansión exterior de las sociedades poderosas.

Siempre que tenemos una civilización, tenemos imperialismo.

La difusión tiene algunas propiedades interesantes para nuestra búsqueda. Primero, la difusión de A a B sitúa a B en una situación subordinada con respecto a A. Los contactos raramente son simétricos, aunque creo que se trata de un fenómeno a corto plazo y reversible.

En segundo lugar, la difusión excluye la invención. Cuando la civilización española se difundió en la civilización azteca, impidió la continuación del desarrollo histórico independiente de este último pueblo, que fundió su destino con el primero. Por lo tanto, nosotros en la Tierra fundiremos nuestro destino con la ETI que contactemos. Continuando el argumento, esto significa que nuestro primer encuentro con una ETI puede ponernos en contacto con más de una civilización extraterrestre, quizá con muchas más.

En tercer lugar, la difusión tiene el efecto de estimular la ETI, es decir, de aumentar el número de civilizaciones técnicas. La razón de ello es que una civilización técnica comunicadora puede influir en otras para que se hagan comunicativas. Eso tiene un poderoso efecto multiplicador sobre f_c.

Creo necesario en este punto presentar o clarificar una distinción entre civilizaciones de evolución primaria y civilizaciones difundidas. Al decir «difundida» me refiero a una civilización que ha recibido ayuda para pasar la frontera de la inteligencia o la frontera de las civilizaciones técnicas a consecuencia de una estimulación directa por parte de una civilización extraterrestre «dadora». Creemos desde luego que nosotros, los de la Tierra, constituimos un ejemplo de la primera clase (primaria), pero no podemos excluir la posibilidad de que seamos un ejemplo de la segunda clase (difundida).

Por lo tanto en la evolución futura de nuestros contactos deberíamos pensar en la sociología del CETI y con ello me refiero a la estructura social de la comunicación entre civilizaciones técnicas. Hemos subrayado los aspectos energéticos de las civilizaciones de tipo II y de tipo III. Me gustaría decir algo sobre los aspectos comunicativos o sociales.

Un posible escenario en la evolución de una civilización técnica puede seguir este curso: el estadio 1 es el estadio de evolución primaria. En el estadio 2 la civilización establece contacto con ETI y se convierte en una civilización comunicadora. Los equipos construidos en esta fase están dedicados de modo mayoritario o exclusivo a la recepción y no a la transmisión; más adelante, en el estadio 3, pueden construirse equipos para transmitir respuestas al dador ETI. En este estadio absorbemos más de lo que damos. En el estadio 3, nos convertimos en una civilización técnica exportadora construyendo equipos para alcanzar otras civilizaciones y empezamos a dar más de lo que recibimos. En el estadio 4 entramos en un estadio experimental muy avanzado para estimular el desarrollo de ETI en otros sistemas planetarios mediante un contacto directo.

Los estadios 1 y 2 corresponden aproximadamente a la civilización tipo I de Kardashev, el estadio 3 a su tipo II y el estadio 4 quizá a su tipo III. En la Tierra estamos ahora en el estadio 1 y tratamos de llegar al estadio 2, pero puesto que tanto el estadio 1 como el 2 son silenciosos, tratamos de entrar en contacto con una ETI «exportadora» en el estadio 3. Luego podemos llegar quizá a descubrir cuál fue nuestra relación previa, si hubo tal, con una civilización de estadio 4.

Finalmente, uno de los problemas inmediatos más difíciles con los que nos enfrentamos para conseguir contactar una ETI, es nuestra limitada perspectiva temporal terrestre. Es

evidente que las civilizaciones técnicas comunicadoras han de ser muy longevas, y eso implica que los organismos, si podemos imaginarlos como tales, sean individualmente muy longevos o bien estén altamente organizados y tengan un fuerte sentido de la continuidad, o ambas cosas a la vez. Se ha planteado la posibilidad de que haya muchas civilizaciones técnicas basadas en organismos de vida corta que no disponen de tiempo suficiente o de suficiente sentido de la escala de la operación para establecer contacto.

Por otra parte quizá se dé una evolución cultural en este sentido y el deseo de establecer contactos pueda empujarnos en una dirección más comprometida con el tiempo, de modo que la CETI pueda tener un efecto de alargamiento sobre L simplemente porque si recibimos una comunicación desearemos estar presentes para conocer la respuesta a nuestra comunicación, aunque el tiempo que tarde pueda medirse en siglos.

Creo que una de las contribuciones que puede aportar la comunidad de las ciencias sociales, tanto aquí como fuera, es el desarrollo de programas de investigación sobre la cuestión del compromiso temporal y el modo de desarrollar instituciones que tengan una vida más larga que las actualmente imaginadas.

VON HOERNER: Quiero analizar las estimaciones sobre la *distancia* entre vecinos, algunas *crisis* de desarrollo y la *duración* de una búsqueda. El objetivo de estas estimaciones no es sólo derivar algunas afirmaciones inciertas sobre otras civilizaciones; si deseamos establecer contacto, tenemos que estimar muchas cantidades, estimaciones que son necesarias para guiar nuestras acciones.

Para calcular la *distancia* deberíamos conocer la frecuencia de la aparición de vida inteligente. Pero al no disponer de conocimientos sobre otras civilizaciones, debemos usar en su lugar suposiciones básicas; voy a utilizar las dos siguientes: «Nada es único» y «Nada dura siempre».

«Nada es único» significa que debemos suponer que el único caso conocido por nosotros, la vida en la Tierra, es más o menos normal y nada especial. ¿Podemos hacer estadísticas con n = 1? Desde luego que podemos, pero debemos conocer sus limitaciones. Con n = 1 se obtiene una estimación para el primer momento o promedio; no hay nada malo en ello. Pero no nos da estimaciones para los momentos superiores, lo que significa que desconocemos el error medio de nuestro promedio estimado. Además nuestro caso especial está sesgado,

porque toda la estimación sólo pudo llevarse a cabo donde existe (alguna) inteligencia, y no en un planeta estéril o sin inteligencia. En resumen: el suponer que estamos en el promedio nos da la probabilidad mayor de estar en lo cierto; pero no tenemos idea de lo equivocados que podemos estar tanto en relación al error estadístico como al sistemático. De hecho los supuestos de excepcionalidad siempre han resultado erróneos en el pasado: China no era el centro de la Tierra, la Tierra no era el centro del universo, nuestra fe no era la única, y así sucesivamente. Luego, lo mejor que podemos hacer es suponer que somos normales y dejar un margen de error bastante amplio.

Algunas estimaciones astronómicas demuestran que probablemente un dos por ciento de todas las estrellas tienen un planeta que cumple todas las condiciones conocidas necesarias para que se desarrolle una vida semejante a la nuestra. Si somos normales, en la mitad de estos planetas se ha desarrollado la inteligencia antes o después que en la Tierra, mientras que la otra mitad es estéril o subdesarrollada. Llamamos $f = 0{,}01$ a la fracción de todas las estrellas donde la vida y la inteligencia están por lo menos tan desarrolladas como en la tierra, y $D = 1$ parsec $\cong 3$ años-luz a la distancia entre estrellas vecinas. La distancia entre formas vecinas de vida e inteligencia superiores es, pues,

$$D_i = D_s f^{-1/3} = 14 \text{ años-luz} \qquad (4)$$

o bien con una incertidumbre, por ejemplo, de $f = 10^{-1}$ a 10^{-3}:

$$D_i = 6 \text{ a } 30 \text{ años-luz} \qquad (5)$$

«Nada dura siempre» significa que no debemos suponer nuestro actual estado de ánimo, con su fuerte dominio de la ciencia y la tecnología, como el único y final objetivo de toda la evolución. Será únicamente un eslabón en una larga cadena, que ha de ser superado por otros (e impredecibles) intereses y actividades. Probablemente la tecnología será mantenida entonces únicamente para que las cosas continúen marchando, pero sin que atraiga a ningún genio individual ni grandes cantidades de dinero público. Yo llamaría a esta terminación del estadio técnico «cambio de interés». En todo caso, debemos suponer una longevidad finita L del estado técnico de la mente; pero puede haber también otras terminaciones.

La tecnología tiene sus peligros, que desembocan en varias

crisis, y pueden dar como resultado la terminación de un estadio técnico o de toda una raza. Primeramente empezamos sólo a experimentar el impacto de la «explosión de la población», con amontonamientos, polución y disminución de recursos; la parte más crucial del fenómeno es el fallo de los instintos y de las estructuras sociales, como se demuestra con experimentos animales. La crisis ha de ser muy general, porque todo miembro de una especie a la que acompaña el éxito ha de poseer un fuerte instinto hereditario de luchar contra su propia muerte y de criar muchos hijos sanos, y ello hace que el uso de la medicina sea emocionalmente mucho más fácil para disminuir la mortalidad que la natalidad.

Esta crisis es más severa de lo que se supone normalmente porque:

a) Nuestro aumento de población no es exponencial, como se dice casi siempre. De hecho la velocidad de crecimiento no es constante, sino proporcional a *N*, y la curva más ajustada para los últimos 2 000 años predice una población infinita en 2026, dentro de sólo 54 años.

b) Aunque se disponga de una tecnología perfecta, el problema no puede resolverse mediante la expansión interestelar. Frank Drake sugirió en cierta ocasión ante una taza de café que la velocidad finita de la luz fija un límite, y esto resultó correcto: si poblamos todos los planetas habitables dentro de una esfera de radio creciente, tal que el volumen de esta esfera aumente un 2 por ciento anual (nuestro crecimiento actual), el límite se alcanza cuando el radio de la esfera aumenta con la velocidad de la luz. Las cifras resultantes son increíblemente pequeñas: el radio límite es únicamente de 50 parsecs = 150 años-luz; dentro de esta esfera hay 30 000 planetas habitables, pero si empezamos hoy con uno y aumentamos al 2 por ciento anual, se necesitan sólo 500 años para poblarlos todos con la misma densidad actual que la Tierra. En definitiva, una velocidad de crecimiento del 2 por ciento anual no puede mantenerse sin un amontonamiento, y volvemos a caer en lo mismo. O bien consideremos las esferas circumestelares sugeridas por Freeman Dyson, donde una civilización altamente avanzada toma algunos de sus planetas mayores (y por otra parte inútiles) y construye con su materia una esfera alrededor de su Sol, a su propia distancia orbital aproximada del Sol. Esto les permite aprovechar la producción de energía de una estrella entera (el tipo II de civilización de Kardashev), e incrementa de este modo su Lebensraum en 10^8, un factor muy alto. Pero también con un 2 por ciento anual un factor de 10^8 se agota al cabo de sólo 1 000 años. Por lo tanto, incluso una tecnología perfecta con los métodos más extremos es incapaz de resolver el problema; sólo puede aplazarlo 1 500 años.

c) El control de la natalidad no puede dejarse voluntariamente en manos de la razón del individuo. Como dijo Barrett Hardin, esto conduciría a una autoeliminación genética de la razón.

En segundo lugar, otra crisis en la que acabamos de entrar es la «autodestrucción». El 10 por ciento exactamente de todo el esfuerzo humano (productos nacionales brutos) está destinado a la fabricación y desarrollo de armas; y nuestra potencia destructiva acumulada suma en el momento actual 10 toneladas de TNT por persona, y su aspecto es el de una bala redonda de dinamita de 2 metros de diámetro por cada persona viviente: abuelas, bebés, todos. Además el estado actual de tablas entre las grandes potencias no puede continuar estable indefinidamente, como indicó Von Weizsäcker: si los sistemas de armamento se quedan anticuados cada siete años, por ejemplo, y han de sustituirse por otros mejores, por lo menos hay una pequeña posibilidad cada siete años de que estalle una guerra: estas posibilidades se acumulan, como es lógico, y con una posibilidad única del 10 por ciento, por ejemplo, la guerra resulta más probable que la paz al cabo de sólo 45,6 años. Esta crisis ha de plantearse también de modo muy general, porque todo miembro de la especie dominante en un planeta ha de tener un fuerte instinto hereditario de dominar, de luchar por todos los medios contra todos los competidores.

En tercer lugar, otra crisis que puede predecirse es la «degeneración genética». Se inició cuando la medicina empezó a eliminar la selección natural, mientras que las mutaciones continuaban su curso. Se precisará un tiempo largo, unos mil años, para llegar a un estado crítico. La única salida es la crianza artificial o por lo menos guiada (que de todos modos es necesaria para un control razonable de la natalidad), y algún día tendremos que iniciarla. Esto es más crítico de lo que parece a primera vista. Por ejemplo, quién y cómo decide las cualidades humanas que hay que favorecer, qué parte de la población hay que impedir que continúe. Traten de imaginar solamente la cantidad de luchas, los grupos de presión, las intrigas, las frustraciones. Y pueden cometerse errores irreversibles.

En cuarto lugar, para superar todas estas crisis (y probablemente muchas más), todas las civilizaciones supervivientes han de haber desarrollado medios fuertes de regimentación y

estabilización, lo cual en muchos casos puede desembocar en el estancamiento, la crisis que acaba con todas las crisis. Y finalmente con una crianza guiada, se hace posible un «estancamiento irreversible».

Resumiendo, la longevidad finita L del estado técnico puede definirse por un cambio de interés o por una entre varias crisis. Si llamamos $T = 10^{10}$ a la edad de nuestra Galaxia y de sus estrellas más viejas, la distancia entre civilizaciones técnicas veçinas es aproximadamente

$$D_t = D_i(T/L)^{1/3} = D_s(T/fL)^{1/3}. \qquad (6)$$

Mas para estimar L no tenemos ni el caso $n = 1$; apenas hemos iniciado el estadio técnico y no sabemos lo que va a durar. En lugar de una estimación podemos formular únicamente una suposición libre, por ejemplo $L = 10^4$ o 10^6 años. Con $f = 10^{-3}$ a 10^{-1}, el intervalo total para D_t es

$$D_t = 140 \text{ a } 3\,000 \text{ años-luz}. \qquad (7)$$

Mi propia conjetura sería $f = 0{,}01$ y $L = 10^5$, lo cual da aproximadamente $D_t = 200$ parsecs = 600 años-luz. Ésta es finalmente la distancia que han de salvar las señales en la comunicación interestelar. El tiempo de espera para las respuestas es, pues, de 1 200 años, lo cual demuestra dos cosas: *a)* se trata de una comunicación entre civilizaciones enteras, no individuos. *b)* Se trata o bien de una comunicación de sentido único, como fue la de los antiguos griegos con nosotros, o bien es de pregunta y respuesta, pero sólo si la escala temporal de desarrollo es de más de 1 000 años, mucho más lenta que nuestro más bien frenético desarrollo.

¿Cuál es la *duración* de la búsqueda necesaria para detectar las primeras señales extraterrestres? Hay tres casos diferentes. En el caso A, nosotros somos de los primeros que lo hayan intentado, y lo mismo les sucede a nuestros socios en perspectiva. Estamos todos más o menos al mismo nivel, deberíamos todos contribuir al mismo esfuerzo, y deberíamos transmitir y recibir. En el caso B, el contacto interestelar se estableció desde hace mucho tiempo. La comunicación tiende principalmente a crear una cultura común, y podemos esperar que se asemeje al mismo origen de la vida: puede ser difícil y lento conseguirlo, pero una vez que aparece, tiende a continuar en el tiempo y a propagarse en el espacio. Por lo tanto, podemos

esperar una comunidad galáctica, mucho más avanzada de lo que nosotros estamos, que intenta atraer la atención de futuros nuevos miembros, probablemente mediante lo que he denominado señales de contacto. En este caso nos limitaríamos a recibir, dejando la carga de una transmisión potente a socios más avanzados. Tendremos éxito cuando hayamos conjeturado el método correcto y construido equipos suficientes. La duración no puede estimarse por adelantado; depenae del tiempo que tardemos en conseguir investigadores inteligentes y compenetrados de su labor. Finalmente, en el caso C, hay una gran cantidad de tecnologías avanzadas, pero nadie está interesado en hablar con nosotros. En ese caso sólo podemos buscar alguna fuga de sus emisiones locales; sabemos lo que buscamos, pero esperamos solamente señales muy débiles. Tras estimar la distancia y la potencia, la duración necesaria para obtener una relación dada entre señal y ruido es proporcional al cuadrado inverso de nuestra área receptora. La duración puede, pues, reducirse pagando un precio superior.

Puede darse una estimación bastante buena para la duración mínima en el caso A. Supongamos que una fracción F de todas las estrellas desarrolla vida superior que pasa por una fase comunicativa en algún momento, de transmisión y recepción, con una duración τ. La distancia entre intentos simultáneos es entonces

$$D_a = D_s(T/F\tau)^{1/3} \qquad (8)$$

y para tener éxito (para conseguir una respuesta) hay que continuar por lo menos durante

$$\tau \geq 2D_a/c, \qquad (9)$$

donde c = velocidad de la luz. Ambas ecuaciones reunidas nos dan

$$\tau \geq (2D_s/c)^{3/4}(T/F)^{1/4}. \qquad (10)$$

Por suerte sólo hay una cantidad incierta F, que entra sólo con la potencia 1/4. Si $F = 0{,}001$ a $0{,}1$, por ejemplo, entonces

$$\tau = 2\,000 \text{ a } 6\,000 \text{ años}, \qquad (11)$$

y la distancia a salvar es

$$D_a = 1\,000 \text{ a } 3\,000 \text{ años-luz.} \qquad (12)$$

Estos valores son mínimos, y de hecho quizá se tarde mucho más. Pero incluso con adecuados medios técnicos, y con un método ideal, se necesitan por lo menos 2 000 años. Lo interesante es que cualquier otro ser en cualquier otro planeta puede hacer la misma estimación y obtener la misma respuesta. Por otra parte creo que el caso A es menos probable para nosotros porque nuestro Sol no está entre el grupo de estrellas más viejas, que son aproximadamente el doble de viejas. Si realmente somos normales, las primeras comunicaciones debieron de discutirse hace ya 5 000 millones de años.

Finalmente me gustaría añadir que la comunicación interestelar puede muy bien tener una importancia crucial para el desarrollo de la civilización, como sucede con el habla en el desarrollo de los individuos. Además proporciona todas las ventajas de la competición (evitando el estancamiento) sin el peor de sus peligros (la destrucción mutua).

KARDASHEV: Muchos de los que han hablado han confesado honestamente que no disponen de respuestas ciertas a estas cuestiones ni dispondrán de ellas en el futuro inmediato. Esta situación se plantea muy a menudo en muchas ciencias y lo más útil en estos casos es adoptar varios modelos de trabajo sobre los cuales se puede luego laborar o que se pueden rechazar. Es evidente que también en este caso sería muy útil adoptar algún modelo formalizado de una civilización que adoptaríamos tras su discusión, para el próximo futuro, y tener varios modelos para poder ver en el futuro adónde conducen nuestros modelos.

Por lo que he podido ver aquí, creo que uno de los problemas más importantes en el desarrollo de los organismos vivientes y de las civilizaciones es el proceso de recepción, elaboración y análisis de la información. Someto esto a sus críticas. Creo que este proceso de selección natural en la evolución de la civilización ha de enlazarse con el análisis y elaboración de la información. Si esto es así, podemos partir de la teoría de la información y tratar de producir varios modelos que podrían extrapolarse en el futuro para ver de este modo lo que sucede en situaciones diferentes, adversas o favorables, lo que nosotros podemos esperar.

Creo, pues, que podemos llegar a la conclusión de que la civilización, el hombre y quizás organismos superiores son sistemas que reciben y procesan información. Gracias a la

selección natural, desarrollan el principio con el cual tratan de procesar y de utilizar una cantidad máxima de información. ¿Podemos presentar esta idea como una base para describir muchos fenómenos, concretamente para describir fenómenos relacionados con civilizaciones distantes?

Nuestra empresa implica una extrapolación de algún tipo hacia el futuro. Tenemos que llegar a alguna comprensión de ello, porque no sabemos qué leyes de la naturaleza pueden operar, leyes que son desconocidas para nosotros y que pueden enlazar a la civilización crítica que tratamos de alcanzar. Todos estarán de acuerdo en que, además de la información que he mencionado, las civilizaciones avanzadas se caracterizarán por atributos inevitables, como escala, energía, espacio y tiempo crecientes. Esto será discutido después con mayor detalle.

Pero me gustaría decir ahora simplemente que el factor más importante aquí es, desde luego, el proceso de la utilización de la información en el período inicial de desarrollo de una especie, para su propia mejora. Quizás en un estadio superior, quizás en el futuro, el conjunto de datos podría afectar el desarrollo de la ciencia, el desarrollo del arte, el desarrollo de la tecnología. ¿Puede extrapolarse esto? ¿Estamos justificados al hacerlo?

La segunda cuestión que me gustaría tocar es la cuestión de la ecuación (1) que inició nuestra discusión. Esta fórmula es también un modelo útil sobre el cual puede trabajarse. Estoy de acuerdo en que ha de incluir un efecto de realimentación. Este efecto de realimentación puede ser positivo o negativo, y eso tendría una influencia substancial sobre nuestras estimaciones.

El efecto de realimentación tiene como consecuencia que el contacto con una civilización podría influir sobre el número de civilizaciones. Podría producirse un súbito aumento, un rápido desarrollo de estas civilizaciones contactadas. Creo que la cifra óptima aquí, la versión más óptima, sería la fusión de dos civilizaciones en una y que al final este proceso podría reducir el número de civilizaciones en cada galaxia a una sola, pero una civilización con unos atributos muy extensos.

Los datos astronómicos modernos implican que el universo corresponde a un modelo de Friedman abierto. En este caso el universo tiene un número infinito de estrellas y de galaxias. Por lo tanto, la ecuación (1) tiene infinitos factores, y el número total de civilizaciones en el universo es infinito. Aparte de los problemas de comunicaciones, el número de civiliza-

ciones cuyas señales pueden alcanzarnos es importante. Este valor es finito, pero aumenta con el tiempo hacia infinito (es proporcional a T^2, donde T es la edad del universo). Por ejemplo, el modelo de universo con una densidad $\rho = 2 \times 10^{-31}$ gramos por centímetro cúbico (este valor dado únicamente por las galaxias es una densidad mínima) da 10^{15} galaxias dentro de nuestro horizonte, en lugar de 10^{11} como se dijo al empezar este simposio.

Mi última observación se refiere al problema del futuro inmediato, que también se ha discutido aquí. Creo, como creen otros, que hay un gran futuro en las computadoras, con un aumento consiguiente en la elaboración de datos. Esto está en buena correspondencia con el principio del máximo aumento de datos que traté de formular aquí. Con respecto al uso de los recursos máximos, hay que tener en cuenta la emergencia esperada del hombre al espacio, que puede ampliar mucho nuestro potencial y en cierta manera puede ayudarnos a evitar las dificultades aquí indicadas.

IDLIS: Me gustaría subrayar el hecho de que el intelecto individual, natural o artificial, constituido de algunas unidades elementales, ha de tener dimensiones finitas y dimensiones relativamente pequeñas. Eso significa que un intelecto individual de este tipo también ha de presentar una capacidad intelectual finita. Esto no significa que no podamos montar un sistema de intelecto superior, significa que tal sistema tendrá que estar dotado de cierta estructura jerárquica. En la sociedad humana observamos que hay grupos creativos, oficiales y no oficiales, visibles e invisibles, y esos grupos pueden observarse también en el campo de las computadoras. Estas estructuras jerárquicas aparecen consideradas en términos suficientemente generales dentro de mi tratado *Teoría matemática del cerebro y tamaño óptimo*. Se trata de una obra sobre la teoría matemática de la organización óptima del trabajo, y en este libro considero la estructura óptima de los grupos de trabajo en la ciencia. Pero creo que los conceptos no son solamente aplicables al caso de investigadores individuales y vivientes; creo que lo mismo puede aplicarse a una estructura jerárquica, incluyendo un sistema formado por computadoras.

Me gustaría mencionar también el problema de definir una civilización en desarrollo cognoscitivo. Para poder estudiar algo debemos, como es lógico, o bien conocer el tema o ser capaces de definirlo. En el caso de CETI no sabemos nada; nos vemos obligados por lo tanto a hacer definiciones. Engels

dijo que las definiciones no significan nada por sí mismas en la ciencia. Sin embargo, constituyen una premisa esencial.

Sugiero que utilicemos como definición de trabajo de una civilización en desarrollo cognoscitivo la presentada por el doctor Kardashev: un estado de la materia altamente estable capaz de reunir, analizar y utilizar la información para un conocimiento máximo sobre el mundo ambiente y sobre él mismo, y para llevar a cabo reacciones de mantenimiento.

La estabilidad relativa es una propiedad de todos los objetos reales. Es una condición necesaria para su existencia. La reflexión pasiva de las condiciones en curso de la existencia corresponde a la materia inorgánica. La reflexión activa, que tiene en cuenta debidamente el pasado real, es una propiedad de la naturaleza viviente y una reflexión avanzada –es decir, un conocimiento del futuro–, es una propiedad de la inteligencia.

A este respecto, la inteligencia, la civilización caracterizada por la inteligencia, difiere de todas las formas anteriores de materia. El intelecto tiene posibilidades ilimitadas de desarrollo en este contexto. ¿Qué pretendemos cuando decimos que esta o aquella civilización está realizando progresos? El concepto de una civilización en desarrollo progresivo se reduce al desarrollo de esa civilización en lo científico, a la solución consecutiva de problemas científicos tópicos. El número de problemas en curso que precisan solución ha de crecer exponencialmente. Si hay necesidad de resolver sólo un problema, esto significa que hemos descrito como solución algo que es simplemente una fase en el examen de un problema. Se trata sólo de una cuasi solución. Si la solución de un problema no desemboca en la necesidad de resolver nuevos problemas, hablamos entonces de un cuasi problema.

Esto no es únicamente un postulado filosófico; es un teorema demostrado matemáticamente, el teorema de Gödel, que implica que ningún campo de la ciencia puede representarse como una lista inagotable de accidentes, que determinan algunos conceptos. Siempre habrá, como demostró Gödel, una situación formulada en función de estos conceptos que no puede demostrarse o refutarse sobre la base de los axiomas establecidos, y más pronto o más tarde será necesario considerar ese postulado o su negación, y después conjuntamente, en una síntesis dialéctica, será necesario refinarlos junto con nuevos axiomas. De este modo los axiomas de la ciencia se expanden ilimitadamente.

Para poder calificar a una civilización en desarrollo progre-

sivo, ha de enfrentarse con todos sus problemas tópicos, en curso. Los ha de resolver en su tiempo adecuado, no los ha de aplazar, porque si una civilización selecciona algunos problemas por considerarlos más substanciales que otros, más tarde se encontrará resolviendo una porción cada vez más pequeña de los problemas reales que se le plantean. Finalmente las civilizaciones estarán resolviendo un único problema, el de su existencia.

Resumiendo, pues, para que una civilización desarrolle el progreso es esencial que ese desarrollo sea exponencial. Desde que la ciencia apareció desde diría yo la época de Newton, el desarrollo de la ciencia no ha dejado de ser exponencial, doblándose cada diez o doce años.

Para que este desarrollo tenga que ser exponencial debemos superar algunos obstáculos. Von Hoerner dice que la expansión cósmica en el espacio sólo puede permitir un desarrollo exponencial durante unos cuantos miles de años. ¿Qué sucede luego? ¿Hay posibilidad de seguir después el desarrollo exponencial? Tenemos no solamente que extender la civilización en nuestro propio universo sino también a través de todas las partículas elementales en los sistemas vecinos coexistentes de mundos, cuasi cerrados: en los últimos años algunos autores han desarrollado la hipótesis de que las partículas que consideramos elementales pueden de hecho contener macrosistemas. Algún día puede darse dentro de ellos una extensión así.

DYSON: Creo que las referencias al teorema de Gödel están equivocadas. El teorema se relaciona con la estructura lógica del mensaje. De hecho la construcción de Gödel proporciona precisamente un mensaje con el cual un lenguaje es capaz de hacer afirmaciones sobre sí mismo. No hay imposibilidad lógica en ello.

PODOLNY: Los historiadores se encuentran en una postura incluso más difícil que la de los astrónomos cuando discuten CETI. Los astrónomos *tienen* la estrella de Barnard. Nosotros no tenemos ni eso. Durante mucho tiempo confiamos que habría en Marte una civilización que podríamos estudiar, pero parece que esa posibilidad se está desvaneciendo rápidamente y ello nos deja sólo la Tierra.

Parece que la cuestión sobre si en definitiva es necesaria la existencia de una sociedad técnica ha sido contestada satisfactoriamente, pero vemos que incluso con el *Homo sapiens,* que fue capaz de crear una sociedad tecnológica, incluso entre

nosotros, existe un grupo grande de gente cuyo avance hacia esa sociedad es tan lento que no podemos ni decir que continuarán progresando hacia este objetivo. Por ejemplo, los aborígenes australianos: resulta muy difícil decir en qué dirección se han ido desarrollando en sus fases más recientes de desarrollo.

Sin embargo, hay pruebas en apoyo del argumento según el cual cualquier tipo de civilización terrestre puede alcanzar una sociedad tecnológica. Apoya ese argumento el caso del Japón, separado de la civilización europea durante mucho tiempo y que sin embargo se desarrolló con un retraso relativamente pequeño, muy rápidamente y en una dirección muy semejante; muchos eruditos japoneses en la Unión Soviética consideran esto como una explicación del impulso que permitió al Japón alcanzar las civilizaciones avanzadas de Europa y llegar hacia la posición de una de las civilizaciones dirigentes del mundo actual.

Algunos historiadores notan también el efecto psicológico, y quisieron hablar durante siglos de «ellos» y «nosotros». Actualmente, y a pesar de todos los acontecimientos del siglo pasado, la humanidad cree cada vez más que constituye un todo, y todos nos estamos convirtiendo en «nosotros». Buscar un «ellos» en algún otro planeta requiere cierta valentía, y me parece que esto explica el interés de muchas personas por CETI.

Debemos mirarnos a nosotros mismos a través de los ojos de un vecino extraterrestre que nos puede observar de lado sin ser influido por nuestra historia, y que puede observar con esa mirada lo que en nuestra naturaleza está determinado por la biología o por nuestra larga y tortuosa historia, y lo que es inherente a nuestra inteligencia y a nuestros sentidos y que nosotros valoramos tanto.

Hay otra parte de la humanidad que también está interesada en CETI, pero el problema presenta aquí un aspecto distinto. La mayoría de estas personas han perdido la fe en la posibilidad de que intervenga en sus vidas algún elemento sobrenatural y buscan algún sustituto de este elemento sobrenatural. Creo que esto da cuenta de una porción considerable del interés por el tema que nos ha reunido aquí. Recuerdo concretamente un libro americano sobre objetos volantes no identificados que empieza con la afirmación categórica de que nuestra civilización debería entrar en contacto e iniciar negociaciones y que finaliza con la declaración de que nuestros gobiernos están escamoteándonos el hecho de que *han* entrado

en negociaciones con otras civilizaciones. Éste es un caso claro de lo dicho.

Hemos creado una comisión para examinar sus implicaciones. Le dimos un nombre algo fantástico: Comité para el Contacto con Inteligencias Extraterrestres. Su composición difiere considerablemente de la de esta reunión. Aquí predominan los astrónomos y los físicos; allí el contingente predominante es de antropólogos, historiadores y psicólogos.

La tarea primera e inmediata de este comité es el examen de algunos problemas para poder aclararnos, diría yo; para examinar los argumentos de quienes dicen que se han producido ya contactos en algún punto del pasado y que hay rastros de visitas hechas a nuestro planeta por representantes del espacio exterior.

Hemos publicado algunos artículos que refutan estas afirmaciones sensacionalistas. Sin embargo, hemos descubierto al mismo tiempo un número de casos que merecen cierto estudio, y voy a detenerme en uno de ellos. Se trata de un documento publicado en 1842, es decir, hace 130 años, cuando todavía no se discutía sobre CETI. Eso, por supuesto, aumenta su verosimilitud. Se trata del informe de un clérigo de un monasterio del Norte de Rusia dirigido a un alto dignatario de la Iglesia rusa, informándole de que el 15 de agosto de 1663 hubo una visita a la Tierra entre las 10 y las 12 horas desde el cielo claro. Apareció una esfera de unos 40 metros de diámetro; de la parte inferior se extendieron hacia tierra dos rayos y salió humo de los lados del vehículo. El cuerpo desapareció y reapareció de nuevo, volvió a desaparecer y a reaparecer, cambiando su brillo en el curso de esas peregrinaciones. El fenómeno se produjo sobre un lago y duró hora y media. En el lugar donde la esfera había tocado el agua apareció una película marrón, como de herrumbre. El fenómeno fue observado por dos grupos de personas. Algunos lo vieron desde la iglesia; los otros desde una barca que en aquel momento estaba en medio del lago.

Hace diez años un radioastrónomo australiano, R. Bracewell, de la Universidad de Stanford, sugirió que puede haberse producido en el pasado una visita al planeta Tierra mediante vehículos automáticos. Una explicación posible del fenómeno descrito es que uno de estos vehículos interplanetarios apareciera realmente en nuestro planeta. Como es lógico, no insistió sobre este fenómeno y puede haber muchos efectos naturales, muchos fenómenos naturales que simplemente no han ocurrido desde entonces.

No voy a entrar en otros casos de que disponemos, pero nuestro comité ha examinado los métodos que sería conveniente utilizar para estudiar estos sucesos y buscar pruebas de tales visitas. El método no ha dado hasta el momento ningún resultado, pero creo que la idea propuesta por nuestros psicólogos merece consideración.

Quisiera referirme al siguiente hecho histórico: hace tres mil años, o quizá algo menos, los fenicios viajaron alrededor de África. Las noticias sobre el hecho se habrían considerado probablemente como mitos o como algo cuestionable si los documentos que han llegado hasta nosotros no afirmaran que en el curso de sus viajes los navegantes observaron que el cielo se movía al revés, en expresión suya. Podemos estar seguros de que esta información fue lo que provocaría más escepticismo entre sus contemporáneos, mas para nosotros constituye una prueba de peso de que ese viaje tuvo realmente lugar. Porque es difícil imaginar que alguien pudiese haberse inventado tal descripción del cielo.

Ven, pues, que la imaginación humana está hecha de tal modo que la gente construye ciertos detalles como hizo Leonardo da Vinci al dibujar un dragón volando. El hombre usa su imaginación muy ampliamente, pero todos los productos de la imaginación humana se basan en realidades. Es nuestro deber descubrir los detalles que no pudieron inventarse y que se refieren a realidades.

INGENIERÍA ASTRAL: LA POSIBILIDAD DE INTELIGENCIAS EXTRATERRESTRES EN LOS FENÓMENOS ASTROFÍSICOS

DYSON: Tengo seis puntos que voy a tratar muy brevemente. El primero es: ¡al diablo la filosofía! Vine aquí para aprender sobre observaciones e instrumentos y confío que empezaremos pronto a discutir estas cuestiones concretas. No tengo competencia para hablar de instrumentos, y por lo tanto seré muy breve.

Punto 2: Nuestra preocupación primaria es observar una civilización extraterrestre, suponiendo que exista; por lo tanto nuestra búsqueda se inclina hacia la gran tecnología, porque la gran tecnología es por definición el tipo de civilización que podemos observar.

Punto 3: Si una sociedad está muy desarrollada tecnológicamente ha de emitir una intensa radiación infrarroja, no necesariamente un espectro planetario, pero sí una gran intensidad de radiación infrarroja, tanto si esa sociedad desea comunicar como si no. En consecuencia deberíamos usar la emisión infrarroja como un indicador que señalase zonas prioritarias hacia las cuales dirigir la búsqueda por radio y con otras técnicas.

Punto 4: Todo programa de observación debería ser primariamente una investigación de objetos naturales. No debería separarse del curso principal de la radioastronomía. Si estudiamos cuidadosamente los objetos naturales más interesantes, tenemos garantizada la recompensa de una cosecha de descubrimientos científicos importantes. La posibilidad de descubrir objetos artificiales, si existen, constituye un premio adicional. Apoyo totalmente la frase de Shklovsky de que todo objeto se ha de suponer natural hasta que se demuestre que no lo es.

Punto 5: Hemos dedicado demasiada atención en nuestras discusiones a los planetas. Los planetas pueden ser buenos lugares donde empezar la vida, pero no son los lugares probables para albergar una gran sociedad tecnológica. En cambio, quizá debiéramos pensar más en los cometas. En nuestro propio sistema solar hay probablemente entre 10^9 y 10^{10} cometas. Como es lógico, el número no se conoce bien, pero es de este orden de magnitud. Si se toma la cifra 10^9, los cometas solares tienen las siguientes propiedades: su masa total es solamente 0,1 de la masa de la Tierra. Pero su superficie total, que desde el punto de vista de la biología es mucho más interesante, resulta 1 000 veces la superficie de la Tierra. Si se tiene en cuenta la masa de material útil biológicamente, es decir, el carbono, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno que hay en la biosfera de la Tierra, la biosfera disponible en los cometas es un millón de veces la de la Tierra. Digo, pues, que los cometas es probable que sean el hogar principal de la vida en el sistema solar. No ahora, sino en lo futuro.*

Punto 6: Una cuestión crucial es saber si los cometas son un fenómeno local de nuestro sistema solar o si penetran por toda la Galaxia. Si llenan la Galaxia, nuestra imagen convencional del viaje interestelar está muy equivocada. La distancia entre los oasis habitables de nuestra Galaxia sería del orden de un día-luz en lugar de muchos años-luz. Como es lógico, eso cambiaría todo el panorama del planteamiento de los viajes interestelares tanto para nosotros como para nuestros competidores. Digo para concluir que deberíamos buscar señales artificiales entre fuentes difusas de emisiones de radio e infrarrojas, en lugar de estrellas individuales, o quizás además de las estrellas individuales.

GOLD: ¿Cree que deberíamos estudiar nuestros actuales cometas del sistema solar en relación a su idea?

DYSON: Es una propuesta interesante en la que nunca había pensado.

OLIVER: ¿Por qué sugiere que las civilizaciones han de producir necesariamente grandes cantidades de radiación infrarroja? Me parece que la radiación infrarroja que produciría una civilización incluso mucho más avanzada que la nuestra sería despreciable en relación con la estrella primaria. Por ejemplo, en California, que presenta un uso muy elevado de electricidad, la generación de energía es actualmente sólo el 0,1 por ciento de la luz solar que cae sobre el estado.

* El apéndice D contiene una discusión más detallada de estas y de otras propuestas semejantes.

DYSON: Lo que decía es que las civilizaciones que son observables para nosotros presentarán este carácter.

OLIVER: Pero creo que usted está sugiriendo que la emisión infrarroja será una característica observable. Yo creo, en cambio, que queda situada muy en lo hondo del ruido estelar.

DYSON: No, digo que la generación de grandes cantidades de radiación infrarroja no es necesariamente un acompañamiento de una alta civilización, en absoluto. Solamente que si se da será algo que podremos observar.

MINSKY: Puesto que toda radiación a temperaturas superiores a los 3° K es antieconómica y constituye un derroche de recursos naturales, cuanto más elevada sea la civilización, más baja será la radiación infrarroja. Tendríamos que estudiar fuentes extensas de radiación a 4° K. Tendría que haber muy pocas fuentes naturales de este tipo.

DYSON: No comparto mucho esta opinión, pero en cierta medida está usted en lo cierto.

GOLD: ¿El estrangulamiento en la emisión corresponde a la energía o a la superficie? Si la superficie de emisión es cara, los 4° K no son muy útiles.

MINSKY: Correcto.

BURKE: Me gustaría desconfiar del vigoroso argumento en favor del infrarrojo, simplemente a causa de la analogía con los recientes descubrimientos de objetos notables en nuestra Galaxia. Los púlsares emiten toda su energía, en una primera aproximación, en la porción de radio del espectro. Creo que el punto 1 tendría que ser examinado a fondo, como advertencia y como guía.

GOLD: ¿Quiere responder?

DYSON: No se trata de una pregunta. Era una declaración.

SAGAN: Harwit ha discutido la posibilidad de detectar en el infrarrojo las actividades de ingeniería astral (en el apéndice E).

GINZBURG: ¿Por qué ve usted tantas ventajas en los cometas? Si usted pensaba en los cometas que conocemos, parecen muy poco adecuados para la civilización. Si quiere cambiar totalmente los cometas ya no serán cometas. ¿Se trata de los cometas que conocemos o bien de cometas artificiales totalmente distintos?

DYSON: Me refería a los cometas de período largo que llegan al sistema solar de muy lejos y luego desaparecen.

GOLD: ¿Por el material que proporcionarían?

DYSON: Sí. Sabemos que llegan al sistema solar con un ritmo de uno cada dos o tres años, y si suponemos que la cosa continúa así durante toda la historia del sistema solar, habrá un gran número de ellos ligados de modo suelto al Sol.

SAGAN: Hay una cifra que puede ser interesante. Uno puede preguntarse: si cada una de las 10^{11} estrellas de la Galaxia tenía una nube de cometas de aproximadamente nuestro número y dimensiones, y si las perturbaciones estelares han ido causando la pérdida de cometas en el espacio interestelar alrededor de estas estrellas al ritmo actual de nuestro sistema solar, ¿cuál es el intervalo medio de llegada de un cometa interestelar en una trayectoria hiperbólica en cualquiera de estos sistemas solares? La respuesta es de unos mil años.

DYSON: Correcto. Por lo tanto, el hecho de que no hayamos visto nunca un cometa interestelar no constituye un argumento en contra.

TOWNES: Puedo entender su idea de que los cometas proporcionan buen material en bruto para las civilizaciones, pero con los tamaños concretos que tienen los cometas individuales y con sus características visibles concretas, no comprendo por qué serían en su forma actual adecuados para las civilizaciones avanzadas. ¿Podría explicarlo un poco más?

DYSON: Tienen la ventaja que uno puede largarse y escapar de su gobierno. Pero aparte de esto tienen simplemente la ventaja de que son abundantes; constituyen el mayor espacio viviente disponible que conocemos.

GOLD: Con el problema adicional de que si se acomodan para un largo período a las condiciones interestelares, y luego

se ven perturbados y caen al interior de un sistema solar, en un plazo de un año o así quedarían aprisionados de repente. Cerca del Sol se produciría un gran lío.

DYSON: Basta con que uno no se acerque al Sol.

KARDASHEV: Al tratar de inteligencias extraterrestres, debemos ocuparnos de algunos modelos definidos; si consideramos un modelo de supercivilización, es decir, de una civilización mucho más avanzada que nosotros, para estudiarla debemos tener en cuenta cosas de las que nada sabemos. Muchos piensan que hoy en día la astrofísica conoce muchas cosas sobre todos los objetos. En mi opinión, eso no es cierto.

Me gustaría discutir un ejemplo de un fenómeno que podría darnos una pista sobre dónde y cómo deberíamos buscar civilizaciones extraterrestres si ellas se aprovechan de este fenómeno. Me gustaría, pues, hablar brevemente del colapso de objetos de supermasa; mi discusión descansa en consideraciones desarrolladas recientemente por el profesor Novikov y el académico Sakharov.*

Examinemos la posición de un observador que acompaña una masa grande que se contrae, superior a 1,5 masas solares. El estado de una masa tan grande ha sido estudiado muy a fondo. La contracción continúa hasta que se alcanza el radio gravitatorio (o de Schwarzschild) r_g; $r_g \simeq 3\ (M/M_\odot)$ kilómetros, donde M es la masa del objeto grande, y $M_\odot$ es la masa del Sol.

Para un observador situado fuera del sistema, la aproximación de una nave espacial a la masa presentará una apariencia definida. A medida que la nave se acerca al radio gravitatorio, todos los procesos observados se irán extendiendo indefinidamente en el tiempo; mientras que para quien se encuentre a bordo del cohete, los procesos seguirán su curso en la escala normal de tiempo. Se trata de un efecto bien conocido.

Pasemos ahora a examinar qué sucede cuando se ha alcanzado el radio gravitatorio. En primer lugar, el observador exterior no lo observará en absoluto. Los ocupantes (dudo en aplicar otro término) de la nave alcanzarán el centro en un período de tiempo $t = r_g/c = 10^{-5}\ (M/M_\odot)$ segundos. Después de esto probablemente todos supondrán que se han perdido, pero algunos nuevos modelos sugieren que pueden conservar muy bien su vida. Eso se basa en un modelo de la contracción de

* *Journal of Experimental and Theoretical Physics* (JETP) de la Unión Soviética, 59, 1970, N7, 262.

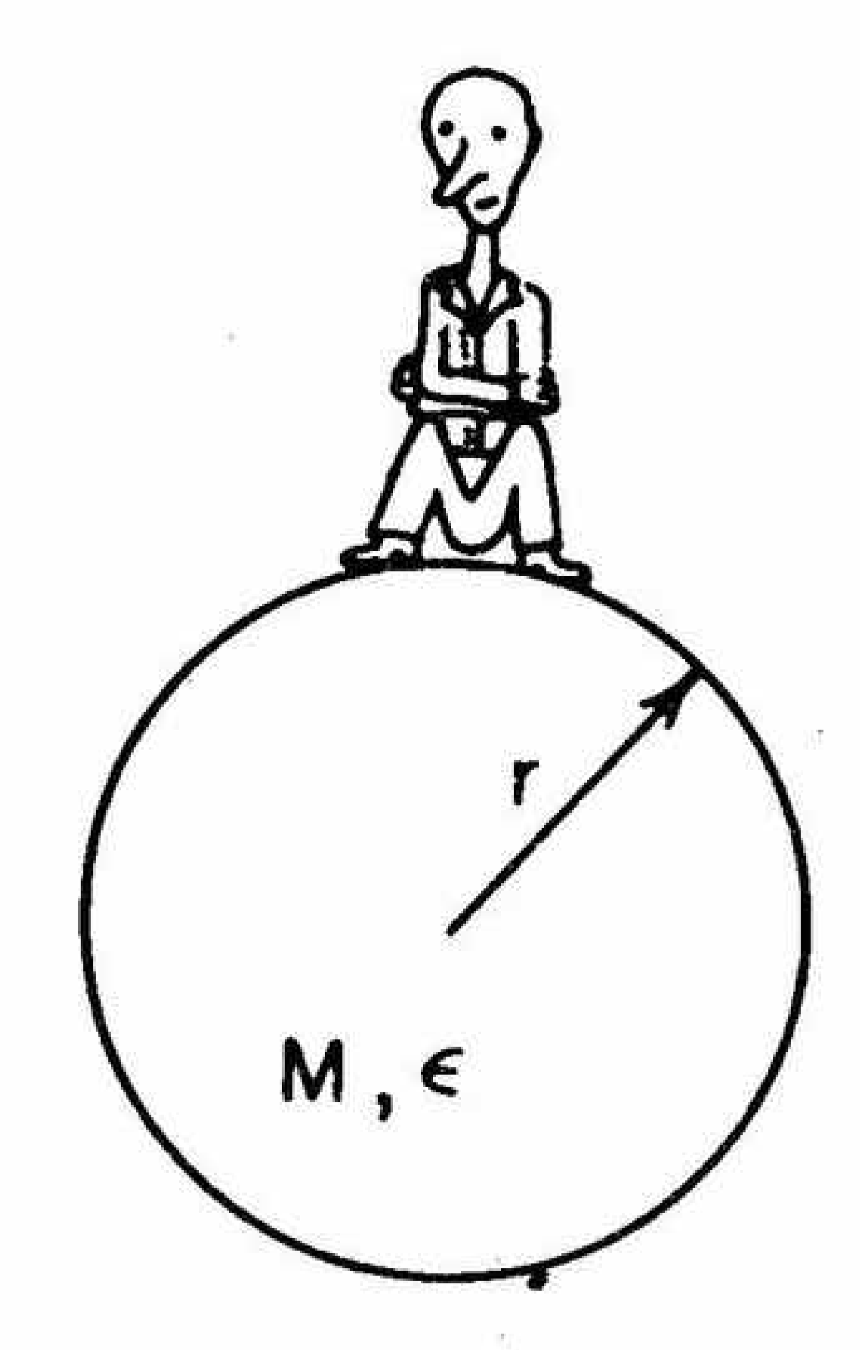


FIG. 11. Un observador situado en la proximidad de un agujero negro de radio r, masa M y carga eléctrica ε. Consideremos el vuelo de una nave espacial hacia una tal esfera de Schwarzschild cargada. Si el cuerpo cargado se contrae y la nave está en su superficie, entonces a medida que $r \to r_1$, donde

$$r_1 = \tfrac{1}{2}\, r_g\, [1 + (1 - \epsilon^2/GM^2)^{1/2}]$$

y

$$r_g = 2GM/c^2)$$

transcurre un tiempo infinitamente largo para un observador situado en el universo exterior. A bordo de la nave espacial puede observarse toda la historia del futuro de nuestro universo si $r \to r_2$, donde

$$r_2 = \tfrac{1}{2}\, r_g\, [1 - (1 - \epsilon^2/GM^2)^{1/2}].$$

En el intervalo entre $r = r_2$ y $r = r'_2$ la nave emerge de la esfera de Schwarzschild y puede examinar este nuevo continuo espacio-tiempo. Cerca de r'_1 es posible observar todo el pasado de este nuevo universo. Aquí r_1 no es igual a r'_1 y $r'_2 = r_2$, porque cerca del final del viaje dominan condiciones arbitrarias, determinadas probablemente por los parámetros físicos en este nuevo continuo espacio-tiempo.

una gran masa con cargas eléctricas (figura 11). También en este caso la masa y la nave se contraen dentro del radio gravitatorio, pero la contracción no continúa hasta una densidad infinita. Se detiene en algún punto no muy alejado de r_g, y es seguida por una expansión. La densidad máxima debe alcanzarse en el momento de su detención. Si la carga es $\varepsilon = \sqrt{6M}$, ρ máx $\approx 10^{18}\ (M_\odot/M)^2$ y $M \geq 10^9\ M_\odot$, tenemos condiciones nor-

males de $\rho \leq 1$ gramo por centímetro cúbico. El objeto pesado con la nave se expande de nuevo por encima del radio gravitatorio. Regresan. Pero la cuestión principal es: ¿Dónde regresan? Para el observador exterior no vuelve a emerger nunca. Al cabo de un período infinito de tiempo todavía no habrán emergido. Deducimos de esto que nuestro espacio es mucho más complicado de lo que parece. Sakharov supone que hay una infinita multitud de espacios separados entre sí por tiempos infinitamente grandes (figura 12). Esto nos proporciona una máquina del tiempo que nos permite cubrir distancias infinitamente grandes en tiempos finitos, y que nos permite cubrir intervalos temporales infinitamente grandes en tiempos propios pequeños. Se trata de algo más bien abstracto.

MORRISON: Sí, muy abstracto. Será un gran viaje para los electrones, pero me disgustaría enviar allí una nave espacial.

KARDASHEV: No se preocupe. Las condiciones de vuelo podrían ser normales. La densidad, radiación y gradiente gravitatorio pueden ser seguros para la vida si ε y M son lo bastante grandes. Supongamos que creamos una esfera cargada que le permite a uno pasar a otro espacio en el futuro infinito; para la nave espacial el paso se medirá en un tiempo propio de microsegundos. Uno explora luego este nuevo universo en su vehículo espacial, que contiene hotel, biblioteca y laboratorio. Luego repite el proceso de colapso y pasa al siguiente objeto. Podemos suponer también una transición semejante del pasado al presente. Según la terminología actual, los objetos que vienen del pasado se denominan agujeros blancos, y a su vez los

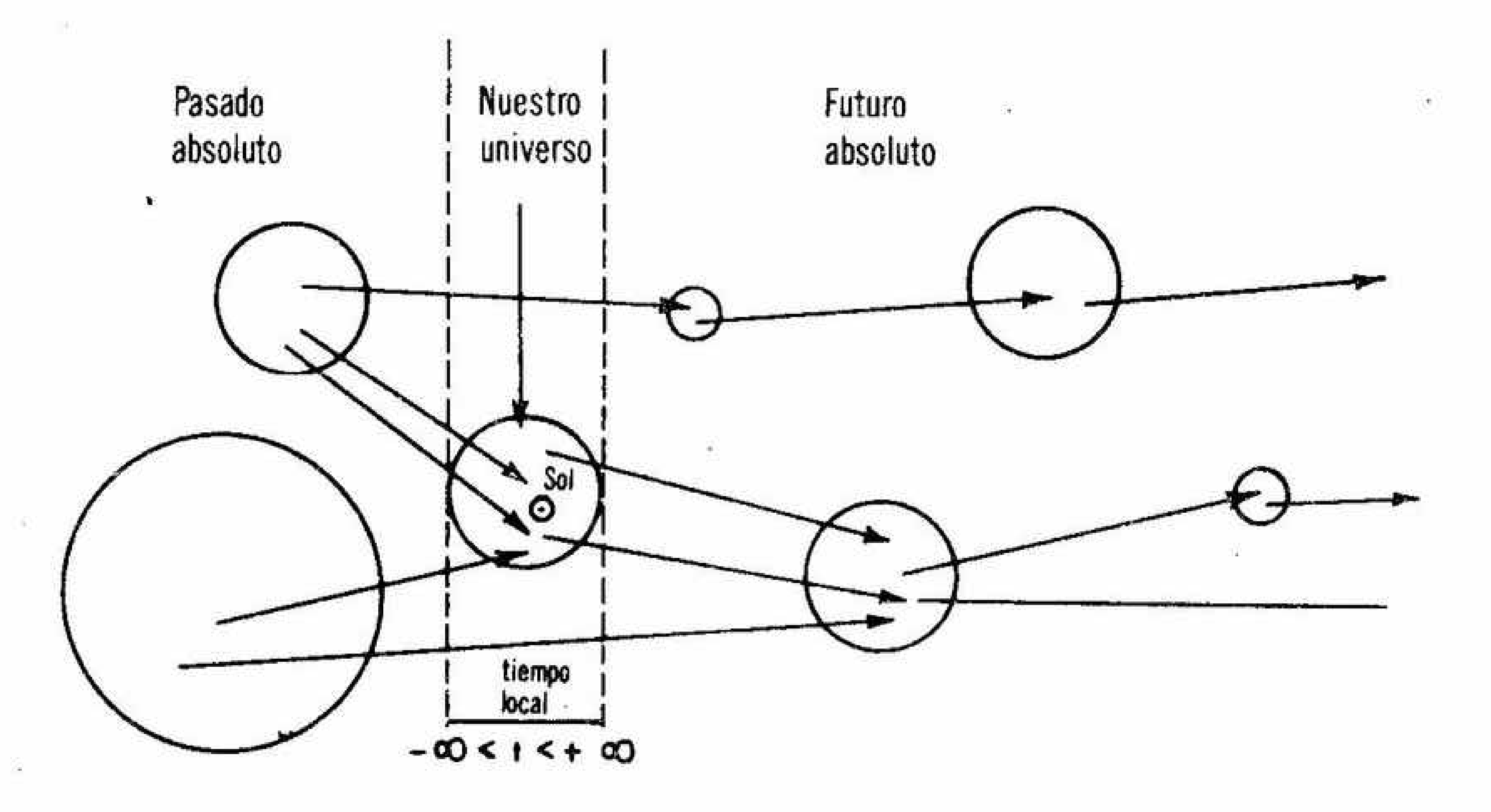


FIG. 12. Representación del aislamiento de nuestro universo en relación a otros «universos», en lo que desde nuestro punto de vista es el pasado absoluto o el futuro absoluto. Las flechas representan posibles travesías de naves espaciales a través de agujeros negros y blancos de una referencia espacio-tiempo a otra.

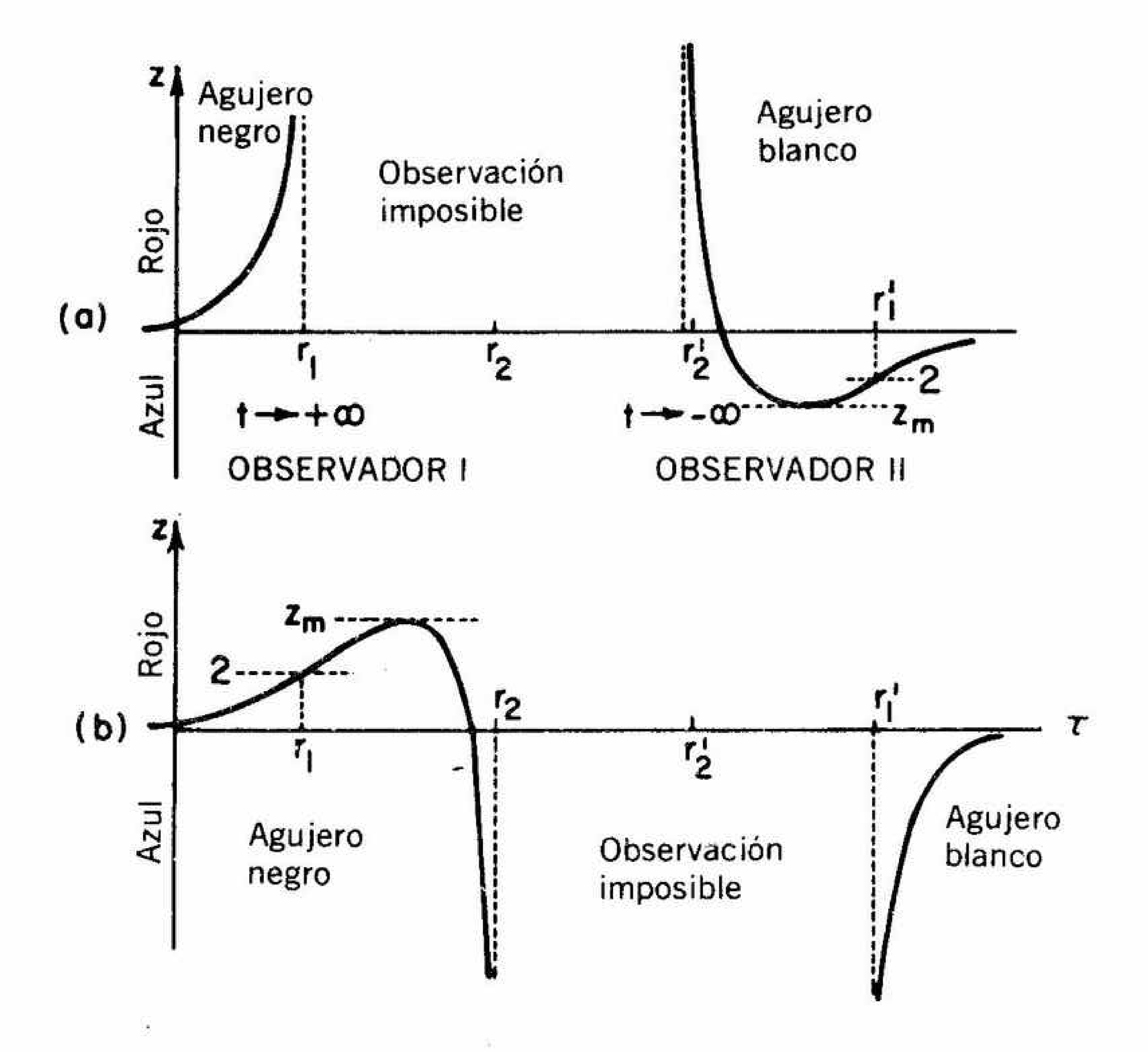


FIG. 13. Representación esquemática de agujeros negros, agujeros blancos y la observabilidad mutua, según Novikov y Sakharov. Los desplazamientos de la frecuencia hacia el rojo y hacia el azul observados por observadores externos y comovientes se miden por z; z_m da los desplazamientos de frecuencia máximo y mínimo. Quizá sea posible sumergirse en un agujero negro y volver a salir por un agujero blanco a una distancia y tiempo infinitos en relación a la partida, a través de los cuales resulte imposible la observación. El gráfico presenta el desplazamiento hacia rojo para un viaje dentro de una esfera de Schwarzschild cargada: (a) para un observador externo que observa el curso de la nave espacial y (b) para un observador de la nave que examina lo que le rodea. Aquí

$$z_m \simeq \left[\frac{2}{1-(1-\epsilon^2/GM)^{1/2}}\right]$$

Compárese con el pie de la figura 11.

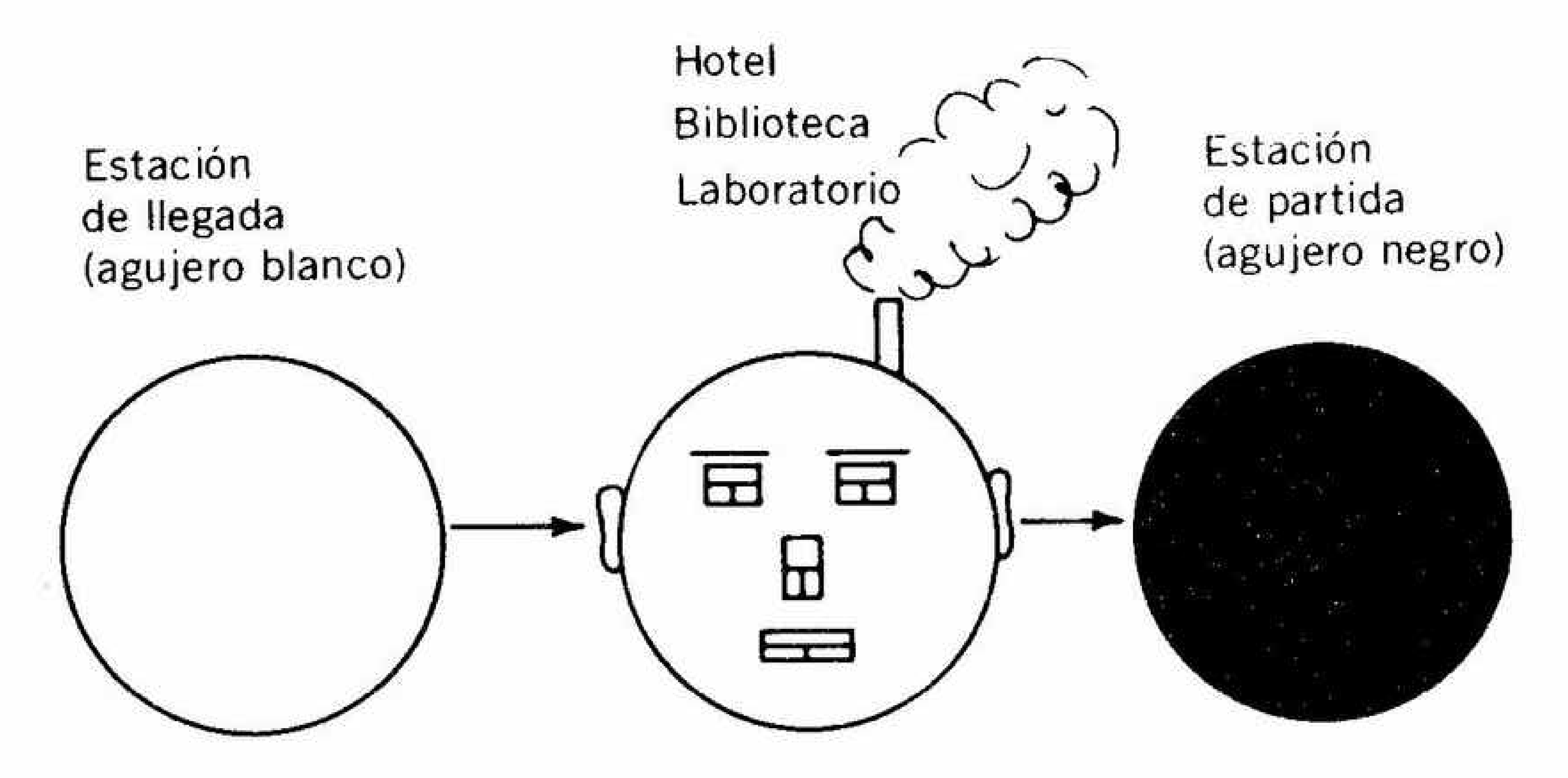


FIG. 14. Representación de una civilización del tipo III según Kardashev. La ilustración es un esquema muy simple.

objetos a través de los cuales podemos entrar en el futuro se denominan agujeros negros. Conviene señalar algunos rasgos interesantes de este viaje. Un observador puede ver todo el pasado del universo durante una breve expansión del agujero blanco y puede ver todo el futuro mientras está inmerso en el agujero negro. La figura 13 muestra los desplazamientos al rojo para los observadores externos y para los que se mueven con el objeto. Estas consideraciones nos conducen a un modelo de civilizaciones tipo III (figura 14) [que se definen como civilizaciones que dominan recursos energéticos $\sim 10^{44}$ ergios por segundo]. Sugiero, pues, para terminar, que los astrofísicos y los investigadores de CETI se concentren en los agujeros blancos y negros y en los procesos que tienen lugar en sus cercanías.

MORRISON: Una pregunta. ¿Cuál es la máxima tensión de marea entre los dos extremos de la cama del hotel en algún punto de este viaje?

KARDASHEV: La tensión de marea depende de las dimensiones del cuerpo en relación al radio gravitatorio. Se han hecho estas estimaciones y parece que todo resulta satisfactorio.

GOLD: Yo pensaba que si el radio era de sólo 2 kilómetros, más o menos, las tensiones serían muy grandes y un ser humano quedaría estirado hasta convertirse en un hilo largo y delgado.

KARDASHEV: Desde luego, pero recuerde que sólo en un tiempo muy corto.

GOLD: No quiero ser hilo largo ni siquiera un breve instante.

DYSON: Si uno desea una temperatura ambiente y presiones normales, ese objeto de supermasa tendrá que ser mucho mayor que una masa solar.

KARDASHEV: Sí, será un quasar.

DYSON: Entonces los tiempos son del orden del día.

SAGAN: Aunque las tensiones de marea sean demasiado grandes para que el sistema funcione, sin embargo esos agujeros negros pueden tener importancia para nuestro problema porque puedo imaginar que representarán peligros importantes para la navegación; las civilizaciones interestelares seguramente querrán rodearlos con boyas para advertir su presencia. Las boyas quizá sean detectables.

MINSKY: Si el tiempo de emergencia es infinito, la probabilidad de que emerja en un momento determinado es estrictamente cero, por lo tanto no se llegará nunca a observar ese acontecimiento.

KARDASHEV: Creo que el agujero blanco/agujero negro más próximo puede estar en el centro de la Galaxia; estamos casi a punto de saberlo. Las observaciones infrarrojas sugieren que cerca del centro de nuestra Galaxia hay una nube muy grande con una temperatura de 270° K.

SAGAN: Lederberg (apéndice F) sugiere que el centro de la Galaxia es un lugar obvio para un transmisor de una civilización tipo II.

Continúo con la impresión de que, aunque nadie sabe lo que está sucediendo en las proximidades de un agujero negro, es evidente que allí tienen lugar procesos de gran importancia. Se dispone de grandes fuentes de energía y podemos imaginar la existencia de aperturas a otros lugares y otros tiempos. Si esto es cierto, puede haber grandes aparatos tecnológicos desplegados en las proximidades de los agujeros negros. Si tuviéramos candidatos razonables para los agujeros negros cercanos, como Cyg X-1, quizá fuera aconsejable incluir estos pun-

tos en nuestra lista de civilizaciones técnicas susceptibles de ser examinadas por radio y por otros medios.

OZERNOY: Me gustaría expresar una idea moderadora en relación a la posibilidad de que existan sistemas tecnológicos cerca de los agujeros negros, como dijo Sagan. A través del radio de un núcleo de quasar hay un flujo de radiación dura en la forma de rayos ultravioleta y X de unos 10^{12} rad por segundo. Cualquier célula cristalina de un aparato computador moderno queda fuera de acción con una irradiación del orden de 10^{14} rad. Aunque imaginemos aparatos cibernéticos con moléculas orgánicas en las cadenas de polímeros, una computadora así quedará fuera de acción en 10^4 segundos o menos. Tenemos que superar, pues, circunstancias especialmente adversas si queremos acercarnos solamente a un quasar, no ya habitarlo.

SAGAN: El campo de radiación, si lo comparamos con las tensiones de marea, especialmente con un objeto de masa estelar, es el menor de nuestros problemas.

GOLD: Dyson sugirió en cierta ocasión que era posible un tipo de seudoquímica en las capas exteriores de una estrella de neutrones con una densidad enorme y con constantes de tiempo muy cortas. Frank Drake y yo nos preguntamos si podíamos tener una forma de vida que aprovechara esta clase de química. Me pregunto si Freeman quiere comentarlo.

DYSON: Sin comentarios.

GINZBURG: Me han pedido que discuta lo siguiente: ¿es posible que en algunos planetas remotos (o cometas, debo añadir ahora) como centros potenciales de ETI existan leyes físicas diferentes? Es evidente que esta pregunta, si pudiese contestarse afirmativamente, tendría poderosas implicaciones en todas nuestras estimaciones y cambiaría mucho la naturaleza de nuestra discusión. Pero utilizo la expresión «Me han pedido que discuta» por un motivo muy concreto, no para que alguien cargue con la responsabilidad de la falta de interés de mi comunicación, sino porque cuando me hicieron esta pregunta tuve la sensación de que la física convencional se basta para tratar el tema. Es suficientemente rica y ofrece muchas posibilidades. Me gusta lo que dijo Dyson: «Vayamos a lo concreto: vayamos al trabajo que tenemos entre manos y examinemos el tema de las posibilidades de comunicación, etc.» Pero yo haré algo diferente, porque éste es mi tema.

No he encontrado nada de interés excepcional, pero lo que encontré da que pensar. Primero de todo, consideremos la perspectiva del hombre de la calle. ¿Por qué hemos de creer que en un planeta diferente han de actuar las mismas leyes físicas? Al fin y al cabo no hemos estado allí. La respuesta más sencilla es que tampoco hemos estado en Marte; tampoco en alguna pequeña isla del Pacífico; pero no tenemos razones para suponer que las leyes de la física sean distintas allí, o si suponemos que hay alguna diferencia en las leyes físicas, podíamos aplicar igual razonamiento a esas islas. De hecho toda la ciencia natural descansa en el postulado de que a condiciones iguales situaciones iguales.

Pero no creo tan trivial la extensión de las extrapolaciones que hemos de hacer para generalizar estas conclusiones. Por ejemplo, en nuestra Galaxia tenemos unos 10^{70} electrones y átomos de hidrógeno. Aunque hemos investigado una cantidad totalmente inconmensurable con este número, estamos muy convencidos de que los átomos de hidrógeno y los electrones son los mismos en todas partes. Pero tenemos un problema aquí.

¿Por qué estamos tan convencidos de que es imposible la Inmaculada Concepción? Sabemos que la partenogénesis es posible incluso en un organismo tan complejo como una pava; y yo leí en una revista que una dama afirmaba que dio a luz un niño sin padre: y como sabía algo de genética, dijo que eso sólo podía significar el nacimiento de una niña, a causa de los cromosomas XX. Nuestra confianza en la imposibilidad de la Inmaculada Concepción descansa sobre un material estadístico limitado.

Demostraré la importancia de este punto, pero lo que ahora quisiera recalcar es que en general sólo podemos esperar algo científicamente nuevo dentro de unas circunstancias nuevas. Una condición nueva de este tipo podría ser otra época de nuestra cosmología evolutiva. Quiero decir que puede haber ocurrido un hecho en una época enteramente diferente, con constantes físicas diferentes. En la teoría general de la relatividad, la constante gravitatoria es de hecho una constante, pero hay formulaciones en las que la constante gravitatoria cambia con el tiempo. Sabemos por experiencia que el cambio relativo de la constante de la gravitación es inferior a 10^{-10} por año, cantidad totalmente despreciable con relación a civilizaciones que están a 1 000 o a 10 000 años-luz de distancia.

El punto siguiente es, sin embargo, más interesante. Se refiere a acontecimientos muy raros. Es muy difícil prohibirlos

en física. Voy a darles un ejemplo de la cosmología de estado estacionario. Esta concepción de un universo en estado estacionario es consistente con la expansión del universo; pero para que la densidad del universo se mantenga constante, ha de producirse el nacimiento de nueva materia, pero ¿cuánta materia nueva? Sólo 10^{-46} gramos por centímetro cúbico por segundo. Esto significa un átomo de hidrógeno por año en un kilómetro cúbico. Un kilómetro cúbico a la presión atmosférica ordinaria contendría más de 10^{34} moléculas de hidrógeno. ¿Podemos estar seguros, en función de la física que conocemos, de que esto, esta aparición espontánea de materia, es imposible? Viola la conservación de la carga del barión; no he pensado mucho en ello, pero a mi entender no podemos prohibir violaciones tan pequeñas de la conservación de la carga del barión. Ha habido intentos para hacer callar a la cosmología de estado estacionario. Creo personalmente que al fin lo han conseguido, pero mediante observaciones astronómicas y no en relación con la conservación de la carga del barión. Esto significa, en resumen, que resulta muy difícil, si no totalmente imposible, prohibir acontecimientos muy raros.

Estos acontecimientos muy raros pueden tener una importancia directa en relación a la existencia de la vida y repercute en la anterior discusión de f_l. Si la vida en nuestro planeta es realmente única, puede deberse a alguna fluctuación increíblemente rara que se relacionaría no sólo con la observancia sino también con la no observancia de la ley física.

Como es lógico, siempre tenemos que hablar de las leyes físicas que conocemos. Éstas están sujetas a limitaciones, y el primer ejemplo que se nos ocurre es el interior de las estrellas de neutrones. Conocemos las ecuaciones de estado de la materia hasta unas densidades de 3×10^{14} gramos por centímetro cúbico, la densidad del núcleo atómico. Para densidades todavía superiores, la ecuación de estado es desconocida y puede darse allí algo inesperado. Creo personalmente que allí todo continúa conforme; pero creo también que la física que conocemos no funciona con densidades de orden cosmológico, cerca de las singularidades que se dan en cosmología. Lo que necesitamos es una teoría cuántica de la gravitación, que en el momento actual no está suficientemente desarrollada.

Si nos ocupamos de la química ordinaria, de las civilizaciones moleculares, podemos utilizar con confianza las leyes físicas que conocemos, con la calificación respecto a acontecimientos muy raros que he mencionado antes, y esto vale del mismo modo para los acontecimientos de nuestra Tierra.

Unas palabras más sobre dos sugerencias relativas a civilizaciones totalmente diferentes en niveles totalmente diferentes: Existe, en primer lugar, un artículo de Cocconi, que no he leído, pero del que he oído hablar. Se pregunta si no sería posible la existencia de alguna forma de vida y de civilización al nivel de las partículas fundamentales. Esto no es absurdo. Conocemos actualmente doscientas partículas que solían llamarse elementales. Este número supera en mucho al de bloques constructivos que utilizamos normalmente en la física molecular ordinaria. Por lo tanto, es muy posible, en principio, obtener sistemas complicados a partir de tales bloques y dispondrían del número enorme de grados de libertad esenciales para la vida. Pero se trata desde luego de pura especulación. No puedo añadir nada.

Mi segundo ejemplo: en los *Annals of Physics* (59 [1970]:111) hay un artículo de M. A. Markov en el que proponía que las partículas elementales eran universos cerrados. Temo que no dispongamos de tiempo suficiente para entrar en ello, pero personalmente considero este tema como algo muy serio, en el sentido de que es ciencia y no diversión. Es una posibilidad teórica muy interesante, pero también totalmente especulativa.

Por lo tanto, y dejando al margen estas posibilidades totalmente diferentes, repito una vez más que en el nivel molecular es mejor olvidar la posibilidad de una física equivocada y preocuparnos de la física que ya conocemos.

Mi última observación se refiere a la física, que actualmente impone muy pocas limitaciones a los acontecimientos o circunstancias desacostumbradas. Pongamos el caso de la superconductividad a alta temperatura. Se trata de mi propio campo y no podré ser imparcial, pero puede estar muy relacionado con la discusión. En el momento actual, el superconductor con la temperatura crítica conocida más alta (21° K, ligeramente por encima del punto de ebullición del hidrógeno líquido) es una determinada aleación de niobio, aluminio y germanio. Todo el problema de la superconductividad a alta temperatura se resume en lo siguiente: ¿por qué no es posible obtener un superconductor, por ejemplo a la temperatura del aire líquido o incluso a la temperatura ambiente? Quiero afirmar que la física actualmente conocida no excluye en absoluto la posibilidad de conseguir estos superconductores de 300° K. Esta superconductividad a alta temperatura puede observarse de modo especialmente favorable en estructuras laminadas o filiformes, que son particularmente interesantes para la biolo-

gía. Les resulta muy difícil a los físicos demostrar que esto es posible, y se trabaja muy activamente en este campo. Por lo tanto, considero que no es cosa de ciencia-ficción suponer que la evolución en algún otro planeta, una evolución con los métodos y materiales que conocemos, haya dado origen a organismos superconductores. Hemos oído hablar de la probabilidad de que exista la vida en otras partes, pero creo que esto no se encuentra al mismo nivel que los demás problemas mencionados aquí.

Una negación de la posibilidad de que otras leyes físicas sean válidas para una civilización molecular impone algunas limitaciones a nuestra ilimitada imaginación, pero deja abierto el campo para un número enorme de posibilidades. La física que hoy conocemos no es una camisa de fuerza.

GOLD: Un comentario sobre la universalidad de las leyes físicas: los astrónomos están muy satisfechos de sí mismos porque han observado que en muchas estrellas, incluso en galaxias muy distantes, se ven las líneas espectrales con la misma estructura que las que aparecen en la Tierra, y de ese modo se tiene un buen indicio de que las mismas leyes físicas son válidas allí en sus detalles finos. ¿Tenía usted algún motivo especial para no invocar este hecho como la prueba más fuerte de la universalidad de las leyes físicas?

GINZBURG: Mi idea básica era que las investigaciones realizadas se refieren a un sujeto muy pequeño del universo, y que la extrapolación que aplicamos es enorme; sin embargo, creo que esa extrapolación es correcta.

CRICK: Me gustaría comentar la sugerencia según la cual podrían utilizarse partículas fundamentales para hacer una nueva química. Como dijo el doctor Ginzburg, somos muy conscientes de que hay un número razonable de bloques constructivos; pero una de las características esenciales de la vida, y especialmente de la vida superior, es la evolución de un grado elevado de complejidad. Esto se consigue en la Tierra, y creo que tendría que conseguirse en todas partes por métodos combinatorios. Eso significa que uno ha de poder hacer combinaciones de las partículas fundamentales de un modo muy variado. Por lo tanto, para seguir seriamente la sugerencia habría que preguntarse si combinaciones tales de partículas fundamentales pueden ser probables.

Hay otra consideración sobre el tiempo que tendrían que durar tales combinaciones. En el sistema que conocemos en la Tierra, la escala básica de tiempos de las reacciones químicas es, pongamos, de 10^{-11} segundos. Ésta es la velocidad de pulsación con la cual tienen lugar las reacciones químicas. Uno podría mostrarse algo más conservador y estudiar la velocidad con que se desarrolla una reacción química real, y eso podría subir el tiempo hasta 10^{-3} segundos. Pero las combinaciones han de durar un tiempo suficiente, creo yo, para que puedan evolucionar mediante algún sistema de selección natural. En el sistema que conocemos en la Tierra el tiempo de generación más corto es, pongamos por caso, cercano a 10^3 segundos.

Por lo tanto, no creo que lo único necesario sea poder formar un número muy grande de combinaciones diferentes, sino que los tiempos de duración de estas combinaciones han de superar con mucho el tiempo en que tienen lugar las reacciones. Si un físico dedicado a las partículas fundamentales pudiera hacer plausible la posibilidad de que se den tanto las combinaciones como una duración suficiente de ellas, creo que deberíamos tomar la sugerencia muy en serio. Pero ¿hay algún indicio de ello en nuestros conocimientos sobre las partículas fundamentales?

GINZBURG: No era mi intención salir en defensa de la idea. La mencioné simplemente para tratar el tema de modo amplio. Lo hice especialmente porque fue una idea de Cocconi, que comparte con el doctor Morrison el honor de ser pionero en este campo de CETI.

Me parece que la complejidad, por una parte, y, por otra, las condiciones de las velocidades de reacción y de estabilidad, en principio pueden satisfacerse.

El doctor Gold acaba de indicarme que la mayoría de las nuevas partículas elementales son inestables. Pero sabemos que en una estrella de neutrones, los neutrones inestables son estables; del mismo modo pueden estabilizarse otras partículas y, por lo tanto, no hay objeción.

CRICK: Sí, pero no sólo pueden ser inestables los bloques constructivos; el elevado número de combinaciones de los bloques constructivos también han de ser estables.

GINZBURG: Es muy posible. Con 200 partículas elementales se pueden hacer en principio muchas más combinaciones estables que en la química molecular.

DRAKE: Puesto que hemos entrado en el tema de la vida macronuclear, que ha sido un motivo de estímulo y diversión intelectual para mí y mis colegas en Cornell, creo que deberíamos añadir a las dos exigencias mencionadas una tercera exigencia importante, que quizá sea difícil de conseguir en las capas exteriores de un objeto en colapso: se trata de una fuente de energía libre que haga posibles los procesos vitales.

Como dijo antes el doctor Sagan, en el caso de la vida terrestre tenemos la diferencia de temperatura entre la temperatura de la superficie del Sol y la temperatura de la superficie de la Tierra, que permite que funcione la máquina térmica o que proporciona la energía libre para la vida. Pero cuando hablamos de vida macronuclear consideramos que existe, por ejemplo, en las capas exteriores de una estrella de neutrones, donde la única diferencia de temperatura razonable es la debida al gradiente de temperatura a través de la dimensión del organismo hipotético, que sería muy pequeña. Parece que hay que buscar otras residencias para esta vida.

SAGAN: Me gustaría volver al tema de la posibilidad de leyes físicas nuevas o alternativas. El doctor Ginzburg ha sugerido que puede haber algunos lugares únicos en los que las leyes de la física sean distintas: por ejemplo, objetos colapsados.

Aludió también a otra posibilidad que medio rechazó: que incluso en circunstancias familiares pueden encontrarse nuevas leyes de la naturaleza. Creo que es una especie de patriotería intelectual suponer que todas las leyes de la física se han descubierto en este año de nuestra reunión. Si se hubiese celebrado esta reunión hace veinte o cuarenta u ochenta años, quizás hubiéramos sacado erróneamente idéntica conclusión. El motivo de la importancia del tema es que si imaginamos unas civilizaciones substancialmente avanzadas respecto a nosotros, pueden haber descubierto hipotéticas nuevas leyes físicas sobre las cuales sólo podemos hacer inciertas conjeturas. Puede ser, por ejemplo, que los canales de comunicaciones preferidos por las civilizaciones tipo II y tipo III estén situados en el dominio de esas leyes físicas que nos falta descubrir.

Pongamos un ejemplo. Hay fuertes objeciones de causalidad contra la existencia de los taquiones, que son partículas de masa imaginaria que no viajan nunca a una velocidad tan baja como la de la luz. Pero esas partículas hipotéticas gozan por lo menos de la respetabilidad de haber sido investigadas por los laboratorios de física. Si esas partículas existen, no hay duda de que constituyen el modo preferido de comunicación, porque

no están limitadas por los tiempos de propagación de la luz, que obligan a todos los canales de comunicaciones de [illegible] que solemos hablar. Y como especula el doctor Harwit e[illegible]péndice G, la velocidad de transmisión de datos con taquiones podría imaginarse simplemente enorme. No insisto en la posibilidad de que esta idea en concreto sea correcta; digo sólo que es característica del problema tal como yo lo veo; la solución de la cuestión CETI puede depender de leyes físicas todavía por descubrir.

Esto, afortunadamente, no tiene muchas consecuencias operativas. Hemos de limitarnos a sacar el máximo partido de lo que disponemos, en el punto de la evolución tecnológica en que nos encontremos. Las sociedades más avanzadas podrán conjeturar lo retrasados que estamos, y si desean comunicar con nosotros, lo tendrán en cuenta. Pero quedará siempre la posibilidad de leyes físicas todavía no descubiertas; creo que sería un error no tener en cuenta esa posibilidad.

GINZBURG: Sí, se trata de una cuestión muy importante. La tenía mentalmente presente y trataré de limitarme a un ejemplo. Tuvo lugar un debate de este tipo sobre un tema que todos conocemos bien, de la mecánica cuántica. La mecánica cuántica nos permite sólo saber la probabilidad de que un electrón dé sobre una pantalla situada tras un objeto. La gente, descontenta, decía a veces que alguna teoría futura con «variables escondidas» proporcionaría una respuesta distinta a la probabilista, y que entonces sabríamos el movimiento del electrón. Este argumento se parece al de usted.

No hay duda de que la ciencia no acaba nunca. Habrá siempre nuevas leyes y clarificaciones. Cuando decimos que es válida alguna ley física, tenemos siempre presente que es válida dentro de un dominio de aplicabilidad. Por ejemplo, la mecánica cuántica no relativista está confinada por unas cuantas limitaciones. Pero eso no significa en absoluto que todas las futuras clarificaciones nos den una respuesta al tema mencionado, la difracción electrónica.

Porque la física molecular, en los fenómenos que imaginamos cuando hablamos de moléculas, está contenida dentro de los límites de aplicabilidad de la física que conocemos. Sólo veo la posibilidad de ligeras desviaciones que, en una terminología probabilística, son aquellos acontecimientos muy raros de que hablaba.

No hay duda: sería muy difícil excluir completamente su ejemplo de los taquiones. Creo personalmente que esos taquio-

nes no existen y que contradicen las leyes que conocemos. Pero es necesario tener presentes mentalmente tales posibilidades. He hablado de la gigantesca extrapolación que estamos emprendiendo, porque en realidad disponemos de muy poco en que apoyarnos y estamos generalizando ese poco para cubrirlo todo. Yo describiría a los taquiones como un ejemplo de la dificultad en extrapolar tanto.

Creo que el único método racional hoy en día en relación con el problema CETI es suponer que se trata de civilizaciones moleculares. Si queremos utilizar nuestra imaginación, mis preferencias irían en favor de Markov. Todas las dificultades mencionadas aquí por el doctor Crick y por el doctor Drake quedan relegadas entonces a segundo término. Debemos considerar un mundo gigante cerrado que desde el exterior se considera como una partícula diminuta, incluso como una partícula elemental. Es algo fantástico, pero muy interesante.

GOLD: Puede haber otro punto, no sólo la posibilidad de que existan leyes físicas distintas de las descubiertas, como dijo Sagan, sino también que haya métodos que superen en mucho nuestros sueños: métodos, sin embargo, que estén plenamente dentro de nuestras actuales leyes físicas. Por ejemplo, un canal de comunicación a un lugar distante que use en cierto modo una energía efectiva acumulativa residente en el espacio interestelar.

MORRISON: Cuando asistí por primera vez a una reunión astronómica hace treinta y cinco o cuarenta años, me impresionó enormemente la elevada edad de los astrónomos presentes, uno de los cuales era Henry Norris Russell, que me pareció tan viejo como Matusalén. Quizás en este contexto no me resulte tan difícil parecer también muy viejo y geológico; pero me gustaría indicar que las propuestas originales formuladas hace una docena de años por Drake, Struve, Cocconi y yo mismo se basaban en un principio muy distinto de lo que estamos discutiendo ahora, y creo que los principios de entonces todavía se mantienen lógicamente.

¿Qué diferencia hay entre nuestra discusión y la de hace cincuenta años? Aunque me resulte difícil de creer, mis lecturas históricas me convencen de que la gente de entonces era tan ingeniosa como mis colegas de hoy en día. Además, la idea de una pluralidad de mundos es por lo menos tan vieja como la filosofía budista. La diferencia es que desde hace una década, más o menos, presentamos un medio para comunicar a través

de una modesta distancia interestelar con una sociedad idéntica a la nuestra. La diferencia es que una conferencia que ignoraba las radiaciones coherentes habría tenido que rendirse. Lo único que constituye una diferencia para nosotros es la radio y posiblemente otras formas coherentes de transmisión de energía.

Continúo creyendo que lo mejor es comenzar teniendo en cuenta este punto singular y obviamente imposible –una comunidad idéntica a cierta distancia– y examinar lo más lógicamente que podamos la manera de desplegar los parámetros necesarios alrededor de este punto singular para llegar así a algunas conclusiones sobre la distancia y la dificultad de esta comunicación.

Cuanta más imaginación tengamos, más fácil resultará, aunque sea muy difícil llegar a alguna conclusión sobre seres situados en quasars dentro de estrellas de neutrones, etc. Estas sugerencias más imaginativas no hacen en absoluto nuestro problema más difícil, sino más fácil. La suma de términos positivos aumenta siempre al añadir un término positivo. Creo que la discusión de puntos situados en un espacio de fases muy alejado de nosotros no es el modo más eficiente de usar nuestro ingenio.

VON HOERNER: Pudiera muy bien ser que civilizaciones superiores dispongan de medios de comunicación que son completamente imposibles para nosotros, e incluso totalmente incomprensibles. Pero si tienen algún interés en hablar con nosotros, tendrían que conocer el modo de hacerlo. Quizá también tengan fijado un límite inferior, una norma por debajo de la cual dejen de interesarse; por lo tanto, la cuestión sería: ¿Hemos alcanzado ya esta norma inferior?

Sólo hay un modo de saberlo, y es intentándolo.

GOLD: Pero yo no estoy muy dispuesto a aceptar su premisa, porque pudiera ser muy bien que los medios de comunicación de que disponen sean de un tipo que no sabemos cómo recibir, y que además no quieran tener los medios suficientemente potentes para comunicarse con señales de radio y ópticas. Esto puede resultarles demasiado difícil tecnológicamente, pero pueden disponer de otros medios que nosotros no reconoceríamos.

VON HOERNER: En este caso no hemos alcanzado la norma.

GOLD: Pero podrían continuar interesados en hablar con nosotros.

TOWNES: Me gustaría añadir un solo comentario a la interesante discusión sobre la observación del profesor Sagan cuando dijo que la posibilidad de leyes físicas desconocidas tiene pocas consecuencias operativas. Creo que tanto las leyes físicas desconocidas como la tecnología desconocida deberían tener un efecto real sobre nuestras actuaciones. Es decir que reconocer alguna probabilidad en esos elementos desconocidos impondría una especie de límite a los esfuerzos que estaríamos dispuestos a aplicar con los métodos que ahora conocemos. No hay duda de que esto tiene una repercusión real sobre la financiación.

SAGAN: Hay todavía otro aspecto de la existencia de tecnologías avanzadas y de leyes de la naturaleza todavía no descubiertas que influye sobre nuestro problema: es la posibilidad de un horizonte de comunicaciones. Es decir: si imaginamos para simplificar que la evolución de las civilizaciones es lineal, de modo que podemos hablar de civilizaciones situadas a tantos años por delante o por detrás de nosotros, puedo imaginar un momento del futuro en el que las civilizaciones estén tan avanzadas respecto a nosotros que sus técnicas de comunicación sean por lo menos de muy difícil acceso. Quizá nuestra situación se parece mucho, pongamos por caso, a la de los habitantes de unos valles aislados de Nueva Guinea, que se comunican con sus vecinos enviando mensajeros o tocando el tambor y que no se dan cuenta en absoluto de la vastedad del tráfico internacional radiofónico y por cable que va encima, alrededor y a través de ellos.

Si imaginamos que existe un horizonte de comunicaciones de este tipo, situado por ejemplo a mil años de distancia en el futuro, esto significa que debemos excluir de las comunicaciones, con una excepción que citaré inmediatamente, a todas las civilizaciones que estén a más de mil años en el futuro. En la discusión de N (véase página 168) hablamos de un valor para L, la duración media de las civilizaciones técnicas en la Galaxia, de 10^7 años, y por lo tanto de $N = 10^6$ civilizaciones de este tipo. Si hay un horizonte de comunicaciones de 10^3 años en el futuro, el número de civilizaciones técnicas accesibles desciende en un factor de 10^4. Eso significa que en lugar de un millón de civilizaciones accesibles en la Galaxia, sólo hay 100; y que si antes la más próxima estaba a unos cuantos centenares de

años-luz de distancia, la más próxima estará a muchos miles de años-luz. (Véase apéndice C.)

Puede haber civilizaciones mucho más próximas a nosotros, pero tan avanzadas que no podamos detectarlas. Las que no lo sean tanto como para que las detectemos, pueden estar tan lejos que su detección exija un esfuerzo muy grande. Si tuviésemos que aceptar seriamente esta consideración, tendríamos que construir sistemas de radiotelescopios mayores que los necesarios si suponemos que todos continuarán hablando por radio hasta muy avanzado nuestro futuro tecnológico.

La única excepción es la posibilidad de que alguna civilización muy avanzada tenga un interés de anticuario y comunique por canales de comunicación obsoletos, para divertirse o por un interés benevolente. Esto podría ser así, pero me gustaría imaginar que no es la regla general. La principal consecuencia de esta otra propuesta es que el mejor modo de búsqueda sería examinar otras galaxias en pos de sus civilizaciones más avanzadas, en lugar de examinar nuestra vecindad inmediata en busca de civilizaciones más o menos del nivel de la nuestra.

GOLD: Nosotros tenemos un interés ocasional por animales inferiores, y eso puede bastarles.

SAGAN: Depende de lo inferiores que sean. Intentamos comunicar con delfines, y perros y caballos, pero muy pocos intentan comunicar con hormigas y protozoos y bacterias.

GOLD: Pero los estudiamos.

PLATT: Intentamos comunicar con niños pequeños.

SAGAN: Sí, pero se trata de saber qué diferencia intelectual imaginamos entre nosotros y seres situados a millones de años en nuestro futuro. Si uno imagina que la diferencia es bastante pequeña queda un margen considerable para el contacto. Si uno imagina que la diferencia es inmensa, continúo diciendo que queda menos espacio para el contacto.

PLATT: Está la cuestión de saber si ellos se esforzarán porque somos unos niños.

MINSKY: Hemos pasado ya por varios horizontes de comunicación en el dominio mismo de la radiación electromagnética. Hace cuarenta o cincuenta años la única modulación segura

era una onda continua interrumpida. Luego se hizo práctica la modulación en amplitud. Pero si uno dispone de un receptor de radio de los años cuarenta tendrá dificultad en desmodular las transmisiones de banda lateral única de la actualidad. Del mismo modo con el equipo de comunicaciones actual será difícil descodificar la modulación de registros de desplazamiento que se está haciendo popular actualmente.

Por lo tanto, incluso en la comunicación por radio, unos pocos años de tecnología hacen incomprensibles las nuevas señales para los emisores de señales viejas.

A medida que una civilización se hace más eficiente, las señales transmitidas se parecen cada vez más al ruido, como demuestra la teoría estadística de codificación de Shannon. Las comunicaciones más eficientes son indiscernibles de un puro ruido gausiano a no ser que uno conozca la palabra del código.

MORRISON: Pero la captación no son las señales.

GOLD: Sin embargo alguien que quisiera comunicar con usted podría transmitir inicialmente una señal que parecería únicamente ruido.

MINSKY: Tendría que hacer una concesión y ponerse algún tiempo a su nivel; tendría que suponer que el otro no dispone de la información necesaria para descodificar su tipo de modulación más sofisticado. Pero si yo emito una señal en banda lateral única no la precedo con una señal en amplitud explicando cómo funciona.

MORRISON: De hecho lo hacemos.

MINSKY: Simplemente poniendo en marcha la máquina transmisora.

MORRISON: Cuando uno no tiene un receptor prefijado, ensaya muchos modos de modulación para abrir el circuito. Cualquier radiotécnico se lo explicará, porque uno no sabe qué canal utilizar.

LEE: Me parece enteramente razonable suponer que una civilización técnica muy avanzada con relación a nosotros quiera dedicar una fracción pequeña, incluso diminuta de sus recursos, a estudiar una sociedad primitiva y las formas inferiores

de vida, del mismo modo que nosotros dedicamos una fracción pequeña, pero significativa, de nuestros recursos a tales empresas. El grupo de presión primitivo de nuestro planeta son los antropólogos, que quieren comprender a las sociedades primitivas (y los orígenes de nuestra sociedad), y los misioneros que quieren convertirlas. Tengo la impresión de que quizá la mayoría de los presentes en esta habitación estamos entre la segunda variedad: nos gustaría impartir nuestra civilización técnica a otras civilizaciones más primitivas. Para no dejar nada al aire y mantener una buena contabilidad en el universo, las civilizaciones avanzadas dedicarán una fracción de sus esfuerzos a entrar en contacto con sociedades primitivas como nosotros.

GOLD: Continúo temiendo que, aunque puedan desear comunicar con nosotros, los únicos medios de comunicación disponibles los limiten. Quizá no seamos capaces de recibir sus transmisiones. Pudiera ser que una civilización avanzada no se dedique a la astroingeniería, a la construcción en una escala gigantesca, sino que prefiera algunos aparatos pequeños muy sofisticados. La radio quizá no les permita establecer contacto con nosotros, mientras que otros medios más sutiles, todavía por descubrir, permitirían quizá tal comunicación.

ORGEL: Me gustaría recalcar que toda civilización que haya alcanzado el tipo II en su tecnología física habrá alcanzado casi con seguridad el tipo II en su comprensión de la biología; por lo tanto, cualquier civilización avanzada que desee comunicar con nosotros podemos suponer que conocerá esos factores que para nosotros son tan difíciles de estimar. Sabrán qué tipo de sistemas biológicos, por lo menos qué tipos de sistemas biológicos de tipo I, deben buscar. Esto me sugiere que no deberíamos considerar la curiosidad en relación a la simple existencia de la vida como un motivo probable para su interés por nosotros.

Sin embargo, creo que por lo menos hay la posibilidad de que exista un grupo de especialistas, de gente interesada en comparar civilizaciones, como hacen aquí los antropólogos al comparar civilizaciones. Esto me sugiere que si nos tienen que observar, y si estas civilizaciones desean comunicar con nosotros, ya se preocuparán de utilizar métodos que seamos capaces de detectar.

A la pregunta de quién utiliza en la actualidad modos de comunicación anticuados, contestaríamos que son los radioaficionados y los boy-scouts. Me parece que deberíamos procu-

rar no encontrarnos con ninguna de estas dos clases al contactar la primera civilización tipo II.

SAGAN: Estoy totalmente de acuerdo en que el subconjunto de civilizaciones avanzadas interesadas en modos antiguos de comunicación intentará adaptar lo mejor posible las impedancias con nuestra sociedad . ¿Pero cuál ha de ser la precisión de esta adaptación? ¿Puede exigir la comunicación con nosotros una adaptación tan precisa que quizá no puedan disponer del conocimiento previo? ¿La dificultad sería del mismo nivel que para nosotros, por ejemplo, tener que aprender japonés? ¿O es posible que exista un amplio margen de técnicas accesibles a ellos y comprensibles para nosotros?

KARDASHEV: Es inevitable que la investigación del problema CETI se lleve a cabo en varias direcciones simultáneas. Hay muchas dificultades adicionales. Tenemos que intentar establecer contacto con otras civilizaciones, pero éstas civilizaciones pueden tener una vida muy corta. Si por otra parte existen algunas supercivilizaciones muy longevas, esas civilizaciones quizá permanezcan calladas. Puesto que no sabemos cuál de estas circunstancias es probable, tenemos que considerar muchas opciones diferentes.

MARX: Estoy interesado en una reunión personal de representantes de civilizaciones de tipo I y en la posibilidad de su llegada, por ejemplo, a Byurakan. Tendremos en cuenta todas las posibilidades no prohibidas por las leyes de la naturaleza que conocemos.

Los objetivos posibles del vuelo espacial interestelar están a muchos años-luz de distancia. Para alcanzar el siguiente sistema planetario en el intervalo de vida de una persona, se precisa una velocidad necesariamente próxima a la de la luz. Por ejemplo, una velocidad del 99 por ciento de la velocidad de la luz c ($v = 0{,}99$, donde v es la velocidad del vehículo medida en unidades de la velocidad de la luz) es equivalente a una energía cinética específica de 443×10^{20} ergios por gramo, según la fórmula relativista,

$$B = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2}} - 1. \tag{13}$$

Para una nave espacial con una masa $M = 225$ toneladas, la energía cinética que hay que concentrar en el vehículo suma 10^{30} ergios. El trabajo necesario para reducir la velocidad y

para el regreso también han de tenerse en cuenta. Esta energía es tan grande que la realización del vuelo interestelar sólo es posible si la energía cinética obtenida del combustible puede concentrarse en el vehículo con una eficiencia no muy inferior al 100 por ciento. Definamos la eficiencia mecánica como*

$$\eta = \frac{\text{energía cinética final del vehículo}}{\text{energía cinética total obtenida del combustible}}. \tag{14}$$

Calculo aquí esta eficiencia mecánica para diferentes sistemas de propulsión. Se han utilizado las leyes fundamentales de la física (conservación de la energía, del momento y del número bariónico). No se han supuesto otras restricciones en las posibilidades tecnológicas.

Consideremos primero la propulsión por cohete. En un instante cualquiera de tiempo sea la masa en reposo del cohete m, su velocidad v. La materia abandona la tobera del cohete con una velocidad relativa w. La masa del cohete disminuye a $m + dm$ ($dm < 0$), y una fracción $\varepsilon\, |dm|$ de la masa en reposo del combustible se convierte en energía cinética. El cohete es acelerado a la velocidad $v + dv$ por el retroceso del combustible quemado y evacuado de masa $(1 - \varepsilon)\,|dm|$. Las ecuaciones de energía y momento en la mecánica relativista dan**

$$\frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2}} = \frac{(m + dm)c^2}{\sqrt{1 - (v + dv)^2}} - \frac{(1 - \epsilon)dm\, c^2}{\sqrt{1 - u^2}}, \tag{15}$$

$$\frac{mcv}{\sqrt{1 - v^2}} = \frac{(m + dm)c(v + dv)}{\sqrt{1 - (v + dv)^2}} - \frac{(1 - \epsilon)dm\, cu}{\sqrt{1 - u^2}}. \tag{16}$$

Introducimos $x = \log_e m$ como variable independiente y derivamos las ecuaciones diferenciales

$$\frac{1}{\sqrt{1 - v^2}} + \frac{d}{dx}\frac{1}{\sqrt{1 - v^2}} = \frac{1 - \epsilon}{\sqrt{1 - u^2}}, \tag{15a}$$

$$\frac{v}{\sqrt{1 - v^2}} + \frac{d}{dx}\frac{v}{\sqrt{1 - v^2}} = \frac{1 - \epsilon}{\sqrt{1 - u^2}}\, u. \tag{16a}$$

* G. MARX, «The Mechanical Efficiency of Interstellar Vehicles», *Astronautica Acta* 9, 1963, pp. 131-139.

** G. MARX, «Über Energieprobleme der interstellaren Raumfahrt», *Astronautica Acta*, 6, 1960, pp. 366-372.

Eliminando u e introduciendo la variable dependiente B se obtiene

$$\frac{dB}{dx} = w\sqrt{B^2 + 2B}. \qquad (17)$$

Donde w, la velocidad de evacuación en el sistema referencial en reposo del cohete está relacionada con la fracción de masa ε por la ecuación*

$$1 - \epsilon = \sqrt{1 - w^2}. \qquad (18)$$

La solución de la ecuación diferencial es

$$\int_{\log_e m_0}^{\log_e m} w\, dx = \text{arc cosh }(B + 1) = \log_e \sqrt{\frac{1 - v}{1 + v}} \qquad (19)$$

Si la fracción de utilización ε se conserva constante durante todo el período de aceleración

$$v = \frac{1 - (m/m_0)^{2w}}{1 + (m/m_0)^{2w}}. \qquad (20)$$

En esta expresión m_0 es la masa inicial del cohete con la velocidad 0, y m es la masa en reposo final del vehículo, que viaja a la velocidad v. La ecuación (20) fue obtenida por primera vez por Ackeret** para ε = constante.

La eficiencia mecánica del cohete puede calcularse fácilmente:

$$\eta = \frac{MB}{\epsilon(M_0 - M)} = \frac{1}{\epsilon} \frac{(1 - v^2)^{-1/2} - 1}{\{(1 + v)/(1 - v)\}^{1/2w} - 1}. \qquad (21)$$

En el caso no relativista $v << 1$ se tiene

$$v = w \log_e \frac{M_0}{M}. \qquad (22)$$

* Puede demostrarse fácilmente que se consigue la eficiencia máxima si la energía cinética total obtenida del combustible se distribuye uniformemente entre la masa expulsada. Esto significa que el factor de masa determina la velocidad óptima de tobera w mediante la ecuación (19).

** J. ACKERET, «Zur Theorie der Raketen», *Helvetia Physica Acta* 19, 1946, 103-112.

Por lo tanto,

$$\eta = \frac{Mv^2/2}{\epsilon(M_0 - M)} = \frac{(v/w)^2}{\epsilon^{v/w} - 1}. \qquad (23)$$

Es decir, que incluso un cohete ideal sólo puede trabajar con buena eficiencia mecánica en la región de velocidades $v \simeq w$. Puede llegarse a las siguientes conclusiones (véase figura 15):

Un *combustible químico* ($\varepsilon \leq 10^{-10}$) implica una velocidad en el escape $w < 10^{-5}$, que puede conseguirse con motores de combustión. El intervalo realizable llega hasta $v = 10^{-5}$. El combustible químico resulta, pues, adecuado para los vuelos a los miembros más próximos del sistema solar.

Un *combustible nuclear* ($\varepsilon \leq 10^{-2}$) implica una velocidad en el escape $w \leq 10^{-1}$, que puede conseguirse con la propulsión eléctrica. El intervalo realizable alcanza hasta $v = 10^{-1}$. Por lo tanto, el combustible nuclear es adecuado para el vuelo a los puntos extremos del sistema solar.

Un *combustible de antimateria* ($\varepsilon = 1$) implica una velocidad en el escape $w = 1$, que puede conseguirse con un cohete fotónico. El intervalo realizable alcanza hasta $v = 1$. La propulsión antimateria / materia es, pues, adecuada para el vuelo a las estrellas más próximas.

Acelerar una nave hasta cerca de la velocidad de la luz (hasta $v = 1$) y alcanzar las estrellas es imposible con combustible químico o nuclear dentro de la vida de una persona, porque la eficiencia mecánica de un cohete químico o nuclear es muy baja en la región relativista. Pero incluso con un cohete fotónico un viaje de ida y vuelta a una estrella situada a 100 años-luz de distancia precisaría muchos millones de toneladas de antimateria.

La principal dificultad en la propulsión por cohete es que la parte del león de la energía cinética obtenida del combustible es absorbida por los gases de escape y sólo una pequeña fracción se concentra en la masa de la nave. Esto es consecuencia directa del equilibrio de momentos. En la región relativista la eficiencia mecánica no es muy probable para los vehículos que se desplazan en el espacio con su propia energía. Para que el vuelo espacial interestelar pueda ser realidad, hay que ima-

ginar un «soporte sólido» para el vehículo, que pueda absorber momento sin absorber demasiada energía cinética. Pero dar con una ruta firme entre las estrellas no es tarea fácil.

Bussard* y otros han especulado sobre la posibilidad de utilizar el gas de hidrógeno interestelar como combustible para un *ramjet* interestelar. Imaginemos un vehículo en funcionamiento continuo que recoge hidrógeno interestelar, lo quema por medio de reacciones termonucleares y lo deja escapar por detrás con una velocidad aumentada. En el sistema referencial en que el vehículo está instantáneamente en descanso, la energía cinética del hidrógeno recogido más la energía cinética liberada en el motor de fusión estará repartida entre el gas de escape y el vehículo. Es evidente que la mayor parte de la energía cinética se la llevan fuera los gases de escape. Demostraremos ahora que en la región relativista la energía nuclear liberada, que es sólo una pequeña fracción de la energía total disponible, se concentra muy fuertemente en el vehículo.** En un intervalo de tiempo dt es absorbida una masa dm del hidrógeno interestelar; de ella se libera una energía $\varepsilon\, dm\, c^2$; la restante masa en reposo $(1-\varepsilon)\, dm$ sale por el escape con una velocidad u y el vehículo con una masa en descanso constante M es acelerado de la velocidad v a $v+dv$. El equilibrio entre energía y momento resulta de las ecuaciones

$$dm\, c^2 + \frac{Mc^2}{\sqrt{1-v^2}} = \frac{Mc^2}{\sqrt{1-(v+dv)^2}} + dm\, c^2 \frac{1-\epsilon}{\sqrt{1-u^2}}, \qquad (24)$$

$$\frac{Mcv}{\sqrt{1-v^2}} = \frac{Mc(v+dv)}{\sqrt{1-(v+dv)^2}} - dm\, uc \frac{1-\epsilon}{\sqrt{1-u^2}}. \qquad (25)$$

De esto se deduce que

$$\frac{d}{dt}\frac{M}{\sqrt{1-v^2}} = \frac{dm}{dt}\left(1 - \frac{1-\epsilon}{\sqrt{1-u^2}}\right), \qquad (24a)$$

$$\frac{d}{dt}\frac{Mv}{\sqrt{1-v^2}} = \frac{dm}{dt}\left(u\frac{1-\epsilon}{\sqrt{1-u^2}}\right). \qquad (25a)$$

* R. W. BUSSARD, «Galactic Matter and Interstellar Flight», *Astronautica Acta* 6, 1960, pp. 179-194.

** Cf. G. MARX, «Interstellar Vehicle Propelled by Terrestrial Laser Beam», *Nature* 211, 2 de julio de 1966, pp. 22-23.

Si llamamos F a la superficie colectora del vehículo y ρ a la densidad del gas interestelar, resulta

$$\frac{dm}{dt} = \rho F v c.$$

Llamemos l a la distancia a la que la masa del gas recogido iguala a la masa del vehículo, y llamemos x a la variable de la distancia medida en unidades de l:

$$ds = cv\, dt = l\, dx \text{ con } l = M/\rho F.$$

Si hacemos uso de una nueva variable independiente x, obtenemos

$$\frac{1-\epsilon}{\sqrt{1-u^2}} = 1 - \frac{d}{dx}\frac{1}{\sqrt{1-v^2}} = 1 - \frac{dB}{dx}, \qquad (24b)$$

$$\frac{1-\epsilon}{\sqrt{1-u^2}}u = \frac{d}{dx}\frac{v}{\sqrt{1-v^2}} = \frac{1}{v}\frac{dB}{dx}. \qquad (25b)$$

Eliminando la velocidad en el escape u, se llega a la ecuación diferencial.

$$\left(\frac{dB}{dx}\right)^2 + 2B(B+2)\left(\frac{dB}{dx} - \epsilon + \frac{\epsilon^2}{2}\right) = 0. \qquad (26)$$

Una solución trivial es $B = 0$. Existe una solución no trivial si hay una velocidad inicial. A partir de la ecuación (26) puede calcularse fácilmente la función inversa $x(B)$:

$$x = \int_{B_0}^{B} \frac{db}{\sqrt{b^2(b+2)^2 + (\epsilon - \epsilon^2/2)b(b+2)} - b(b+2)}. \qquad (27)$$

La ecuación (27) contiene una integral elíptica. El factor de utilización del gas interestelar es $\varepsilon < 0{,}01$; por lo tanto es posible un desarrollo en serie de potencias con respecto a $\alpha = \varepsilon - \varepsilon^2/2$. Se obtiene

$$x = \mathfrak{F}(1+B) - \mathfrak{F}(1+B_0),$$

donde

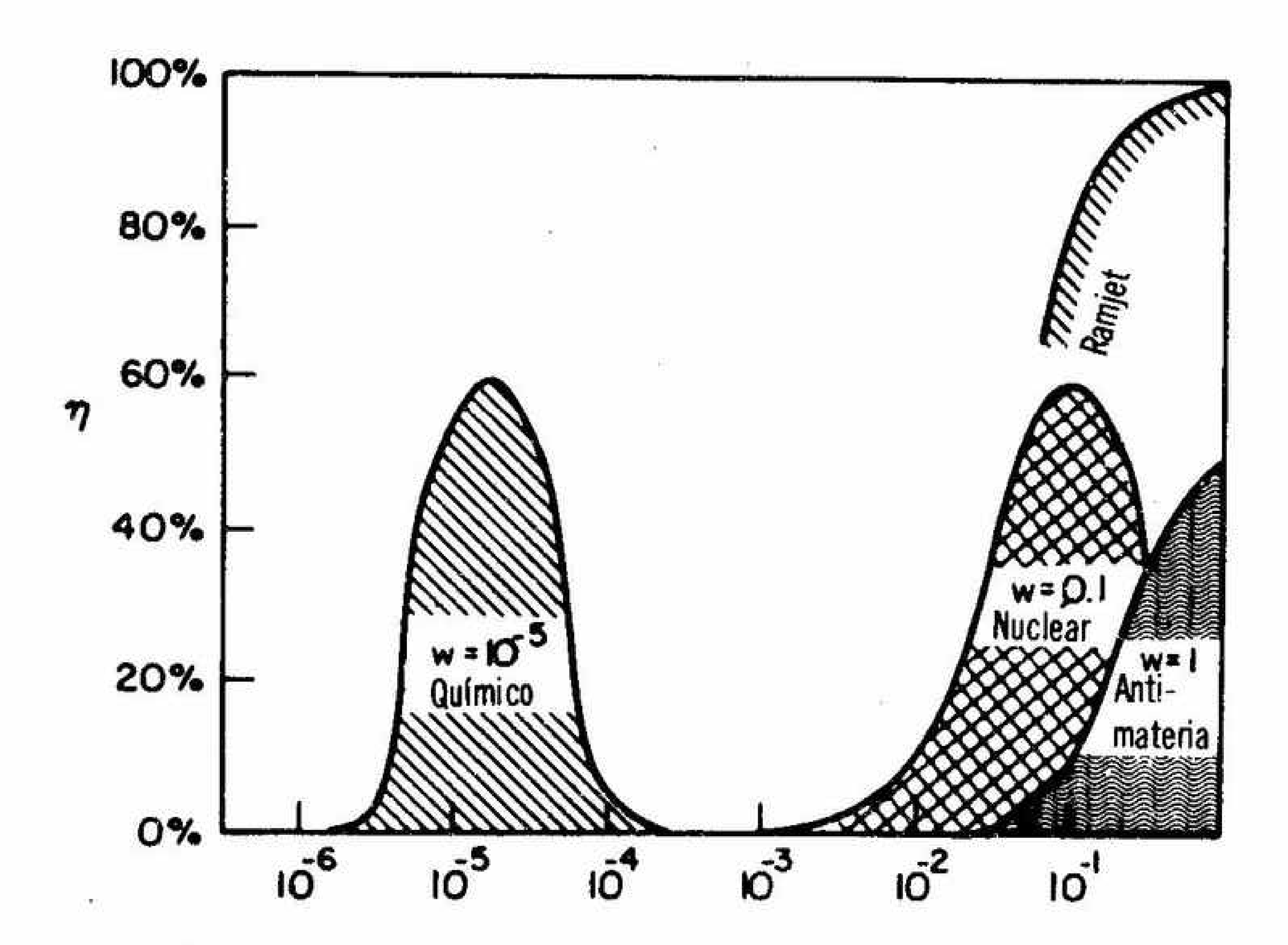


FIG. 15. Eficiencia mecánica η del cohete en función de la velocidad v (tomando como unidad la velocidad de la luz) para cuatro mecanismos diferentes de cohete. El parámetro w es la velocidad en la tobera del cohete en su sistema de referencia en reposo. En principio, para conseguir las velocidades y eficiencias mayores, hay que recurrir a los *ramjets* interestelares.

$$\mathfrak{F}(\xi) = \frac{1}{\alpha}\xi + \frac{1}{4}\log_e\left(\frac{\xi-1}{\xi+1}\right) + \frac{\alpha}{16}\left[\log_e\left(\frac{\xi-1}{\xi+1}\right) + \frac{2\xi}{\xi^2-1}\right] + \frac{\alpha^2}{64}\left[3\log_e\left(\frac{\xi-1}{\xi+1}\right) + \frac{6\xi}{\xi^2-1} - \frac{2(\xi^2+1)}{(\xi^2-1)^2}\right] + \cdots. \quad (28)$$

Para velocidades relativistas ($B >> 1$) la fórmula (28) converge muy rápidamente. La eficiencia mecánica viene dada por la ecuación

$$\eta = \frac{B - B_0}{\epsilon x}$$

$$= 1 - \frac{\epsilon}{2}\left[1 + \frac{1}{2}\frac{\log_e\left(\frac{B}{B+2}\right) - \log_e\left(\frac{B_0}{B_0+2}\right)}{B - B_0}\right] + \cdots,$$

donde se han despreciado los términos de orden ε^2, $\varepsilon^2 \log_e B$, $\varepsilon^{n+1}B^{-n}$ ($n \geq 1$). Puede verse que en dominio relativista ($\varepsilon << B$) un *ramjet* interestelar puede alcanzar una eficiencia del 99 por ciento mediante la fusión nuclear (figura 15).

Otra posible manera de impedir el despilfarro de energía es transferir el momento de retroceso a la Tierra.* Debido a la gran masa de la Tierra, la energía de retroceso transferida es despreciable, como en el caso de un coche que corre en una carretera sólida. Consideremos el siguiente sistema de propulsión,** como una realización de este principio: Un vehículo que parte presenta una sección transversal efectiva de área F, vista desde la Tierra, y actúa como un espejo perfecto en la dirección de detrás. Un rayo de luz de intensidad constante I procedente de una fuente luminosa terrestre es reflejado por él. Si el vehículo se desplaza con una velocidad v, la intensidad I de la luz reflejada resulta ser inferior a I. El vehículo es acelerado durante el tiempo dt a la velocidad $v + dv$. El equilibrio entre energía y momento es ahora

$$IF\,dt + \frac{Mc^2}{\sqrt{1-v^2}} = \frac{Mc^2}{\sqrt{1-(v+dv)^2}} + I'F\,dt, \quad (29)$$

$$\frac{IF\,dt}{c} + \frac{Mcv}{\sqrt{1-v^2}} = \frac{Mc(v+dv)}{\sqrt{1-(v+dv)^2}} - \frac{I'F\,dt}{c}, \quad (30)$$

que puede escribirse también de la forma siguiente:

$$I - I' = \frac{Mc^2}{F}\frac{d}{dt}\frac{1}{\sqrt{1-v^2}}, \quad (29a)$$

$$I + I' = \frac{Mc^2}{F}\frac{d}{dt}\frac{v}{\sqrt{1-v^2}}, \quad (30a)$$

o

$$I = \frac{Mc^2}{2F}\frac{d}{dt}\sqrt{\frac{1+v}{1-v}}, \qquad I' = -\frac{Mc^2}{2F}\frac{d}{dt}\sqrt{\frac{1-v}{1+v}}; \quad (31)$$

$$v = \frac{(1+2\tau)^2 - 1}{(1+2\tau)^2 + 1}. \quad (v = 0 \text{ para } \tau = 0). \quad (32)$$

Donde τ es la razón de la energía luminosa $W = I \cdot F\,dt$ a la energía en reposo Mc^2 del vehículo:

* Esta idea fue utilizada por Jules Verne. En su novela, el viaje a la Luna lo lleva a cabo un proyectil lanzado por un cañón gigante, fijo a la tierra. El problema es que un hombre no puede sobrevivir tras aceleraciones tan terribles.

** G. MARX, *Nature* 211, 2 de julio de 1966, pp. 22-23.

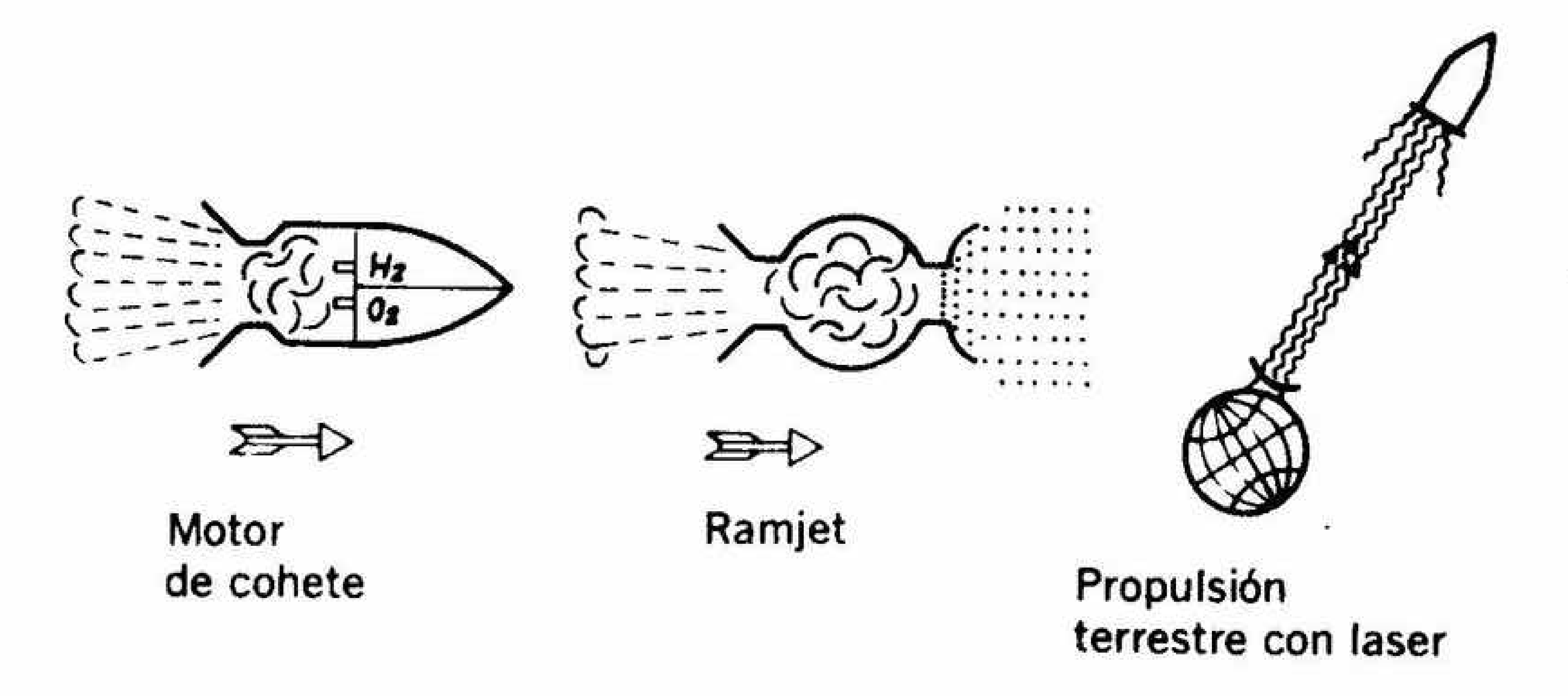


FIG. 16. Representación esquemática de tres mecanismos de vuelo espacial interestelar: cohetes (con un ejemplo químico, pero que podrían ser igualmente nucleares o de antimateria); *ramjets*, que utilizan el medio interestelar como fluido de trabajo, y un mecanismo que utiliza ùnos sistemas de laser planetarios para acelerar y decelerar el vehículo espacial.

$$\tau = \frac{F}{Mc^2} I\, dt. \tag{33}$$

Sustituimos (32) en (31) y calcularemos la «eficiencia mecánica instantánea»:

$$\eta_i = \frac{dE_{\text{cin}}}{dW} = \frac{I - I'}{I} = 1 - (1 + 2\tau)^{-2}. \tag{34a}$$

Si $\tau \rightarrow \infty$, entonces $v \rightarrow 1$ y $\eta_i \rightarrow 100$ por ciento; casi toda la energía de radiación que cae sobre el espejo que retrocede con una velocidad relativista se convierte en energía cinética del vehículo.

La «eficiencia mecánica total» puede definirse como la razón de la energía cinética del vehículo (partiendo del reposo) a la energía de radiación del rayo que le alcanza:

$$\eta_\tau = \frac{E_{\text{cin}}}{W} = \frac{1}{1 + (2\tau)^{-1}}. \tag{34b}$$

Empieza con un valor muy bajo cuando $v < < 1$, y sube hasta el 100 por ciento cuando el vehículo ha alcanzado una velocidad relativista. De este modo, si se tiene «la tierra sólida bajo los pies», la principal dificultad del vuelo espacial relativista desaparece. La figura 16 da una representación esquemática de los tres mecanismos de propulsión.

No hay que pasar por alto las dificultades tecnológicas de estos esquemas. Una nave espacial tripulada no puede permitirse una aceleración arbitrariamente elevada. Se puede ir aproximando a la velocidad de la luz con una aceleración de un g durante una distancia del orden de un año-luz. Es necesario un enfoque ideal para que no se desperdicie energía de radiación. El laser ofrece el grado máximo de enfoque. Incluso en este caso sólo los rayos X pueden ofrecer una razón suficientemente pequeña entre la longitud de onda y el diámetro. El haz de rayos X estará fuertemente desplazado hacia el rojo desde el vehículo; por lo tanto, las restricciones del espejo no son muy fuertes.

Hasta el momento actual no hay pruebas de que se haya producido una visita interestelar a la Tierra. Este hecho histórico no constituye un argumento contra la existencia de civilizaciones extraterrestres, porque las leyes fundamentales de la física no permiten el vuelo espacial relativista con cohetes a sistemas planetarios alejados, utilizando un sistema de propulsión independiente. El contacto directo, suponiendo que sea posible, sólo puede realizarse tras haber establecido un contacto por radio. He aquí un posible proyecto: La cápsula espacial es acelerada a una fracción de la velocidad de la luz mediante una propulsión por cohete iónico y combustible nuclear. A continuación un haz laser de rayos X ligado a un planeta empuja la nave y la acelera hasta una velocidad próxima a la de la luz. La propulsión *ramjet* sólo será adecuada al pasar a través de nubes interestelares densas. Todos estos sistemas de propulsión pueden funcionar con una eficiencia considerable. A la llegada puede producirse la deceleración de la nave espacial del mismo modo, con la ayuda activa de la civilización receptora. La salida para el regreso y la llegada a la Tierra siguen un proceso similar.

Por lo tanto, la vieja idea de la ciencia-ficción sobre una invasión desde el espacio exterior está prohibida por la ley de conservación del momento. El contacto personal con una civilización extraterrestre no es completamente imposible, pero puede ser únicamente una empresa en colaboración de dos sociedades amigas y cooperativas.

GOLD: Si estuviera usted dispuesto a enviarme en este viaje espacial, ¿podría asegurarme que el viaje de ida y vuelta duraría en total un tiempo razonable? Yo no aceptaré más de 2 g de aceleración en la mitad del recorrido hasta mi destino, y 2 g de deceleración en la otra mitad, y lo mismo para el viaje

de regreso. ¿No supera con mucho el viaje la duración de mi vida?

MARX: Si puede aceptar una aceleración y deceleración de 1 o 2 g, puede ir y volver durante su propia vida. El problema principal es que se precisaría realmente un enfoque muy bueno.

GOLD: De momento podemos ignorar la cualidad del enfoque del rayo laser o la cuestión de construir un espejo de rayos gamma. Los restantes problemas son bastante serios.

SAGAN: Con un vehículo espacial capaz de una aceleración uniforme de 1 g hasta el punto medio del viaje y de una deceleración de 1 g después, y utilizando la transformación de Lorentz, el tiempo para Epsilon Eridani es de cinco años de tiempo de la nave; la distancia a las Pléyades es de diez años de tiempo de nave; y la distancia a las Nubes de Magallanes es de veintitrés años de tiempo de nave.* De hecho usted podría circunnavegar el universo dentro de su propia vida.

GOLD: No está mal, pero cuando volviera me encontraría estos lugares terriblemente solitarios.

PEŠEK: Dentro de poco tiempo habrá estaciones espaciales en órbita con telescopios y astrónomos a bordo. Me gustaría saber cuáles son las perspectivas de detectar sistemas planetarios extraterrestres desde tales estaciones en órbita o desde una estación en la Luna.

GOLD: Los planes actuales que yo conozco de estaciones orbitales no contribuirán de modo significativo a la solución de este problema. El único plan actual del que sé algo y que contribuiría de algún modo a esta cuestión, es la propuesta en favor de telescopios en órbita muy grandes, de aperturas muy grandes, que según se propone irán principalmente sin tripulación o quizás asistidos en ocasiones por el hombre. Esos telescopios podrían mejorar el problema astrométrico superando lo que hemos podido hacer hasta el momento desde el suelo y, por lo tanto, permitirían descubrir alrededor de qué estrellas cercanas puede haber planetas. Estos telescopios nos darían incluso la posibilidad, en el caso de las estrellas más cercanas,

* C. SAGAN, «Direct Contact among Galactic Civilizations by Relativistic Interstellar Spaceflight», *Planetary and Space Science* 11, 1963, pp. 485-498.

de observar directamente mediante la reflexión de la luz objetos del tamaño de Júpiter. Pero se trata todavía de un proyecto mayor y bastante alejado en el futuro.

Las estaciones orbitales habitadas actualmente en estudio —por lo menos los planes que yo conozco— no disponen de tales técnicas observacionales. Como es lógico, ignoro los planes soviéticos de estaciones habitadas. No sé si incluyen telescopios muy grandes.

MOROZ: Dos palabras sobre este punto. Hay motivos para creer que la longitud de onda más ventajosa para la comunicación interestelar debería desplazarse al intervalo submilimétrico, alrededor más o menos de la décima de milímetro. Si no me equivoco, CETI requerirá en estas longitudes de onda estaciones orbitales, porque la atmósfera terrestre no transmite esta banda de onda. Pero este tema lo abordaré más tarde (p. 264).

GOLD: Si es cierto que la utilización de longitudes de onda que la atmósfera no transmite ofrece alguna ventaja substancial, no hay duda de que desearemos llevar a cabo la tarea desde estaciones espaciales. Pero la cuestión de si tienen que ser tripuladas es algo muy distinto.

SAGAN: [Nota añadida en pruebas]: Los problemas energéticos actuales, tan serios, tanto en los quasars como en la física de ondas de gravedad pueden superarse si imaginamos estas fuentes de energía concentradas en nuestra dirección. Pero un haz preferencial concentrado en nuestra dirección tiene poco sentido a no ser que haya algún mensaje en estos canales. Podría ser válida en los quasars una observación semejante. Hay un gran número de otros fenómenos incompletamente conocidos, desde los estallidos decamétricos en Júpiter hasta la estructura de la emisión de rayos X con una gran resolución en el tiempo que quizá podría imaginar debida a ETI. Quizá debamos preguntarnos, a la luz de la presentación del doctor Marx, si esta estructura fina de algunas fuentes fluctuantes de rayos X se debe a lasers pulsados de rayos X para el vuelo espacial interestelar. Pero no hay duda de que se mantiene el principio de Shklovsky de suponer que estas fuentes son naturales hasta que no se demuestre lo contrario. La inteligencia extraterrestre es la explicación como último recurso cuando todo lo demás ha fallado.

La historia de los púlsares demuestra claramente que unos

fenómenos que al principio se parecían mucho a las manifestaciones esperadas de ETI, al final pueden resultar objetos naturales, aunque de un tipo muy insólito. Pero incluso en este caso quedan sin examinar posibilidades interesantes. ¿Ha examinado alguien sistemáticamente la secuencia de las amplitudes de los púlsares y los ceros de polarización? Se necesitaría sólo un escudo móvil muy pequeño sobre la superficie de un púlsar para modular la emisión a la Tierra. Esto aparece mucho más fácil que generar todo un púlsar para la comunicación. Para hacer señales de noche resulta más fácil ondear una sábana ante un fuego existente que iniciar y apagar un conjunto de fuegos con una estructura que comunique un mensaje dado.

KARDASHEV: Sin anticiparme en nada a lo que podría decir el doctor Moroz, me gustaría señalar la posibilidad de detectar grandes estructuras de astroingeniería a través de su radiación térmica propia y distinguirlas de las nubes de polvo. Se trata físicamente de un fenómeno simple. Una nube de polvo y una estructura sólida grande deben presentar un espectro continuo. Sin embargo, hay una diferencia sencilla. En el caso de una construcción de estado sólido tenemos una emisión puramente planckiana. En el intervalo de longitudes de onda inferiores, esta emisión sería proporcional al cuadrado de la frecuencia. En el caso de una nube de polvo, el tamaño del polvo es inferior a la longitud de onda y la dependencia tendría una pendiente más pronunciada que el cuadrado de la frecuencia.

En la actualidad conocemos un número bastante grande de fuentes infrarrojas, y sin embargo sólo conocemos la parte de las ondas cortas. Necesitamos un estudio exacto de la parte del espectro que contiene las ondas largas, a saber el espectro en la región de los 100 micrones, para examinar qué es lo que consta de pequeñas partículas de polvo y qué es lo que consta de grandes bloques.

MORRISON: ¿No depende esto del grueso, de la profundidad óptica?

KARDASHEV: Sí, pero de un modo conocido.

TÉCNICAS DE CONTACTO

SHKLOVSKY: Volvemos ahora al problema importante de los proyectos directos para establecer comunicación con ETI si estas inteligencias existen. Tengo que decir que diversos participantes tienen opiniones distintas sobre la importancia relativa del problema, el problema total de CETI y el problema de desarrollar proyectos concretos para la comunicación. Creo personalmente que los problemas generales no son menos importantes que los proyectos concretos, pero todos estamos de acuerdo en que el progreso actual conseguido por la tecnología es suficiente para discutir tales proyectos.

DRAKE: En el curso de este simposio ha quedado claro que cualquier intento para detectar ETI ha de ser capaz de detectar manifestaciones de ETI desde distancias de centenares de años-luz. Ahora entramos en la discusión de los medios que podrían conducir a tal detección, y confiemos en conseguir algunas conclusiones sobre los medios que parecen más prometedores.

Puede utilizarse la economía en el método de detección de la comunicación como una guía para saber qué medio es mejor, porque sin duda todas las civilizaciones considerarán importante la economía.

Con este criterio como guía podemos eliminar inmediatamente como muy improbables varios medios de comunicación, aunque debemos preocuparnos siempre de tener presente que no podemos predecir con certeza lo que harán otras civilizaciones, y, por consiguiente, sólo podemos presentar probabilidades subjetivas sobre lo que parece más prometedor.

Por ejemplo, es claramente improbable que el medio de comunicación consista en poner una nota, un mensaje en la punta de un largo bastón y alcanzar las estrellas más próximas,

aunque un bastón así se haga autónomo cuando esté a más de 22 000 millas de la Tierra. Del mismo modo, los cohetes, como ha dicho el doctor Marx, no parecen especialmente apropiados para la comunicación interestelar.

Por otra parte, y como se ha indicado repetidamente, si uno considera las ondas electromagnéticas como medio de comunicación, resultan efectivas, rápidas y muy económicas. La ecuación que gobierna el intervalo en el cual un enlace de comunicaciones electromagnéticas puede operar es

$$R^2 = \frac{P_t G_t A_c}{4\pi P_{det}}, \qquad (35)$$

donde

$$P_{det} = kT_s(B/\tau)^{1/2}. \qquad (36)$$

En esta ecuación R es la máxima distancia a la cual puede operar el enlace; P_t es la potencia transmitida; G_t es la ganancia de la antena transmisora o del telescopio. El producto P_tG_t da lo que se denomina potencia efectiva radiada del sistema. El término A_c es la superficie colectora del telescopio receptor, y P_{det} es la potencia mínima detectable del sistema receptor, que podemos describir con mucha aproximación mediante la ecuación (36), donde k es la constante de Boltzmann, T_s es la temperatura de ruido del sistema, B es la amplitud de banda y τ es la constante de tiempo.*

Para ilustrar lo efectivas que pueden ser las ondas electromagnéticas, podemos tomar como ejemplo en el intervalo de radiofrecuencia el actual radar de Arecibo. Aquí P_t es de 10^6 vatios y G_t es de 10^6. Si tomamos para el sistema una temperatura de 20° K, una amplitud de banda de 100 hertzios, y una constante de tiempo de 100 segundos, el alcance resulta ser de 2 000 parsecs, es decir, unos 6 000 años-luz, lo cual es un alcance muy grande. En relativamente poco tiempo llegará a 20 000 parsecs, es decir, que el radar de Arecibo será visible para instrumentos similares en toda la Galaxia.

Permítanme que recuerde una historia, cuyo análisis nos conduce lógicamente a través del desarrollo de este tema. Hacia 1960 los radiotelescopios se habían desarrollado en la Tierra hasta tal punto que R había alcanzado distancias interestelares de muchos años-luz. Resultó razonable entonces buscar señales de radio interestelares y ello dio origen al proyecto Ozma en el Observatorio Nacional de Radioastronomía, en el cual se investigó con un telescopio de 85 pies la radiación de las dos estrellas más próximas, del tipo espectral del Sol, Tau Ceti y Epsilon Eridani. Elegimos una radiofrecuencia de 1 420 megaherzios por la razón incontrovertida y claramente correcta de que el equipo construido se podría utilizar en radioastronomía convencional y así nadie podría acusarnos de malgastar dinero.

* Los símbolos B y τ tienen significados distintos de los que tenían en la discusión anterior del doctor Marx sobre el vuelo espacial interestelar. *(Nota del editor.)*

Al mismo tiempo, el profesor Morrison y su colega Giuseppe Cocconi en Cornell elaboraron una razón más controvertible quizás, pero mucho más estimulante para utilizar esta frecuencia; a saber, la sugerencia de que era una frecuencia única en el espectro de radio que podía ser utilizada por una red de civilizaciones galácticas para la comunicación. Esto significó de hecho el nacimiento de un concepto muy importante, del que se ha hablado mucho: la idea de que otras civilizaciones pueden crear señales de balizamiento, señales especiales destinadas a atraer y a poner en contacto a otras civilizaciones emergentes.

En Ozma se investigó una amplitud de banda de 400 kiloherzios y se utilizó una amplitud de banda receptora de 100 herzios y una constante de tiempo de 60 segundos. La potencia efectiva radiada que se podía detectar era de 10^{13} vatios, un nivel de potencia que ya es posible conseguir en la Tierra. No se detectaron señales, pero si tenemos en cuenta nuestra estimación de que sólo 1 de cada 10^6 estrellas como máximo tienen tales señales (p. 168), los resultados no son sorprendentes.

Desde aquella época el concepto de una frecuencia única o de frecuencias mágicas se ha hecho realmente muy débil como criterio para guiar las investigaciones interestelares. La línea del hidrógeno ya no es la única. Tenemos líneas espectrales en la frecuencia del OH; tenemos las líneas más intensas del cielo procedentes del vapor de agua, por lo menos de las que conocemos, y tenemos toda una multitud de líneas espectrales. Por lo tanto, en la situación actual no hay argumentos compulsivos en favor de una determinada frecuencia única.

Mientras se desarrollaba esta situación descorazonante, se inventó otro criterio para escoger frecuencias. Esto continuó hasta que se descubrió la radiación de cuerpo negro a 3° K, y este hecho, unido al sistema de ruido, condujo de nuevo a una definición no única de la frecuencia económica.

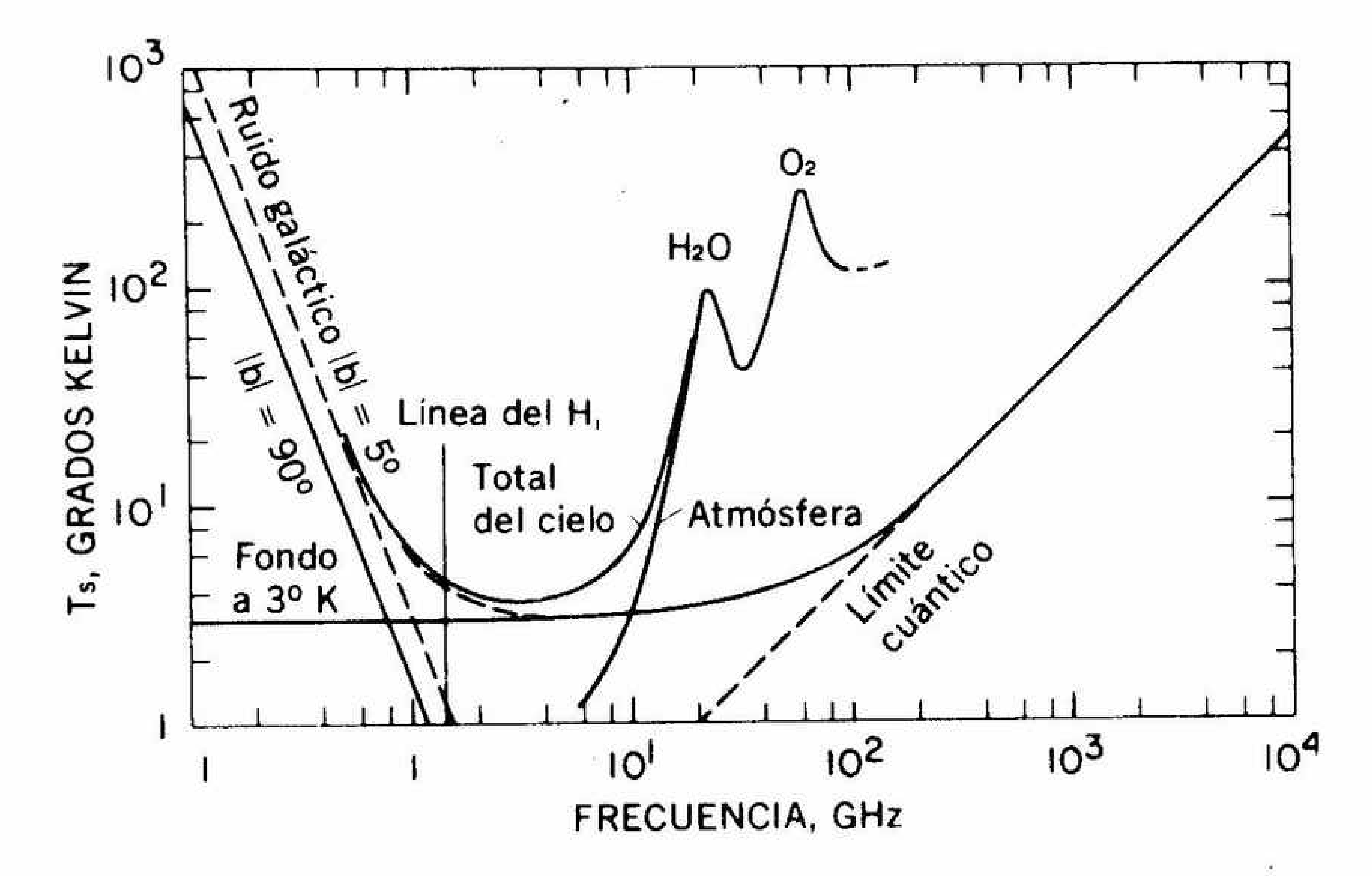


FIG. 17. La temperatura de ruido del sistema T_s en radioastronomía en función de la frecuencia, y teniendo en cuenta a la derecha el ruido cuántico. La radiación del cuerpo negro a 3° K aparece en la parte inferior. Las fuentes de ruido galáctico en dos latitudes galácticas distintas están a la izquierda.

Podemos verlo en la figura 17, donde están las fuentes de ruido, el ruido cósmico a la izquierda, la radiación de cuerpo negro a 3° K hacia la base, y a la derecha el ruido cuántico, los cuales se suman entre sí y no dan un T_s con un mínimo bien definido sino un mínimo amplio de valor constante que se extiende desde unos 1 200 megaherzios a 50 gigaherzios. Por lo tanto, la frecuencia económica no está bien definida y nos encontramos en la desgraciada situación de carecer de criterios compulsivos para escoger una frecuencia concreta en la cual buscar señales de balizamiento.

El profesor Oliver sugirió muy pronto, como idea alternativa para escapar de esta situación, que las transmisiones podían ser pulsantes y por lo tanto existir en casi todas las frecuencias. Sin embargo esto no disminuye nuestro problema, porque hay tantos intervalos a investigar como intervalos de frecuencia. Además las pulsaciones sufren una gran distorsión interestelar, como sabemos en el caso de los púlsares, y eso no es ninguna solución. Oliver reconoció este problema.

Hemos alcanzado, pues, un punto crucial en el que podríamos detectar fácilmente señales de balizamiento a distancias enormes. Pero no sabemos en qué frecuencia buscar. La figura

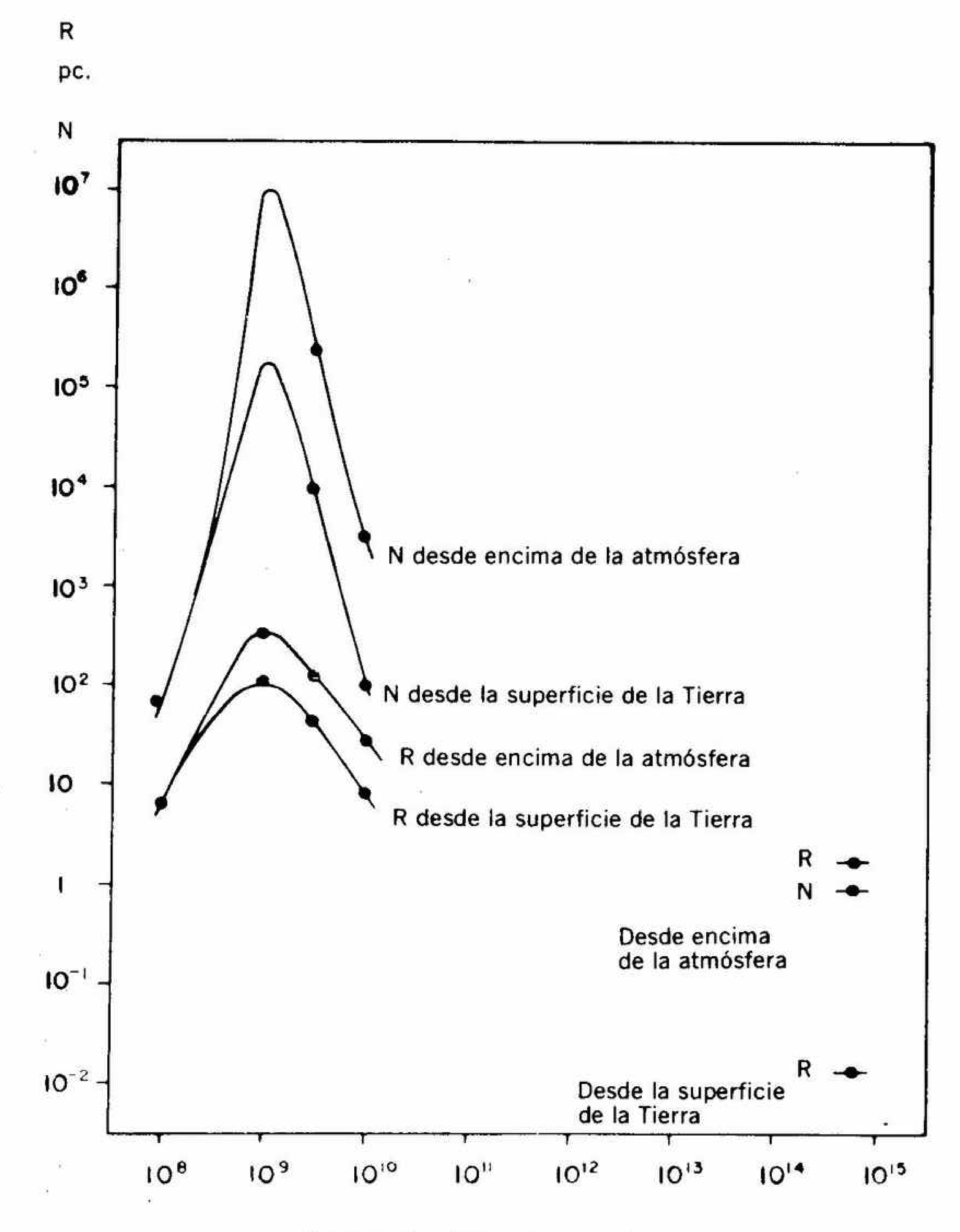
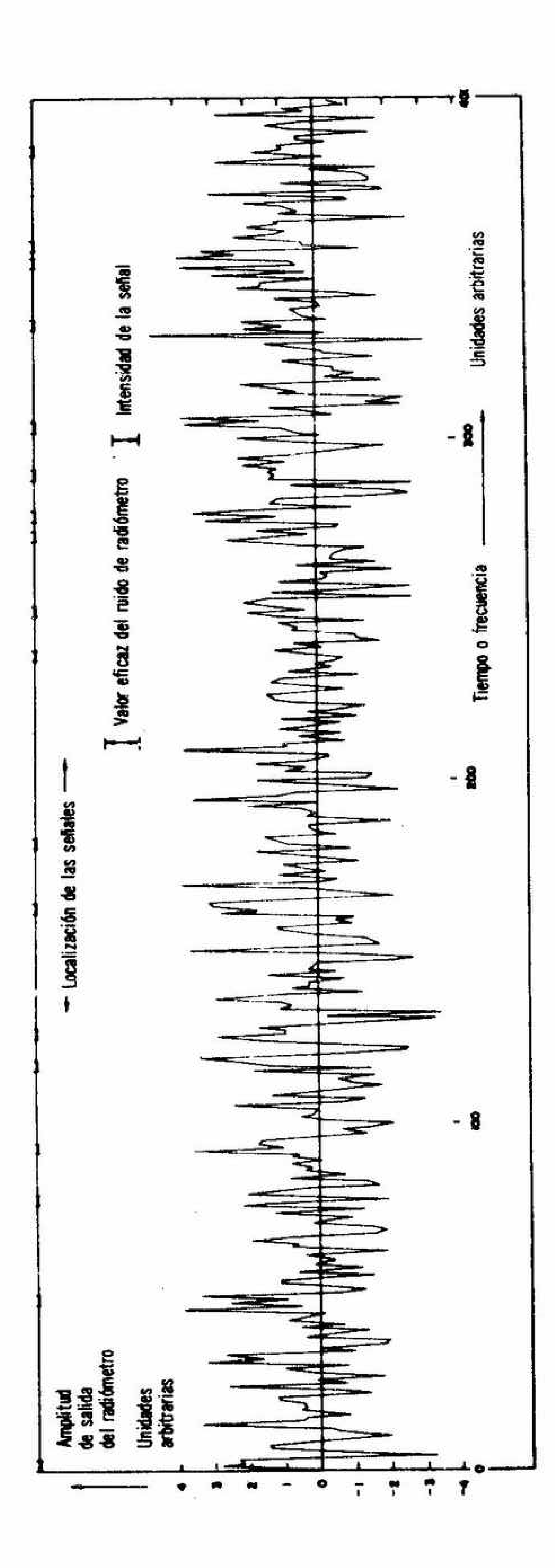


FIG. 18. Comparación de diversas frecuencias del espectro electromagnético para el contacto interestelar. Estan indicadas, con los equipos actuales, las distancias R en parsecs y el número N de estrellas dentro de esa distancia que podrían detectarse con la tecnología actual.



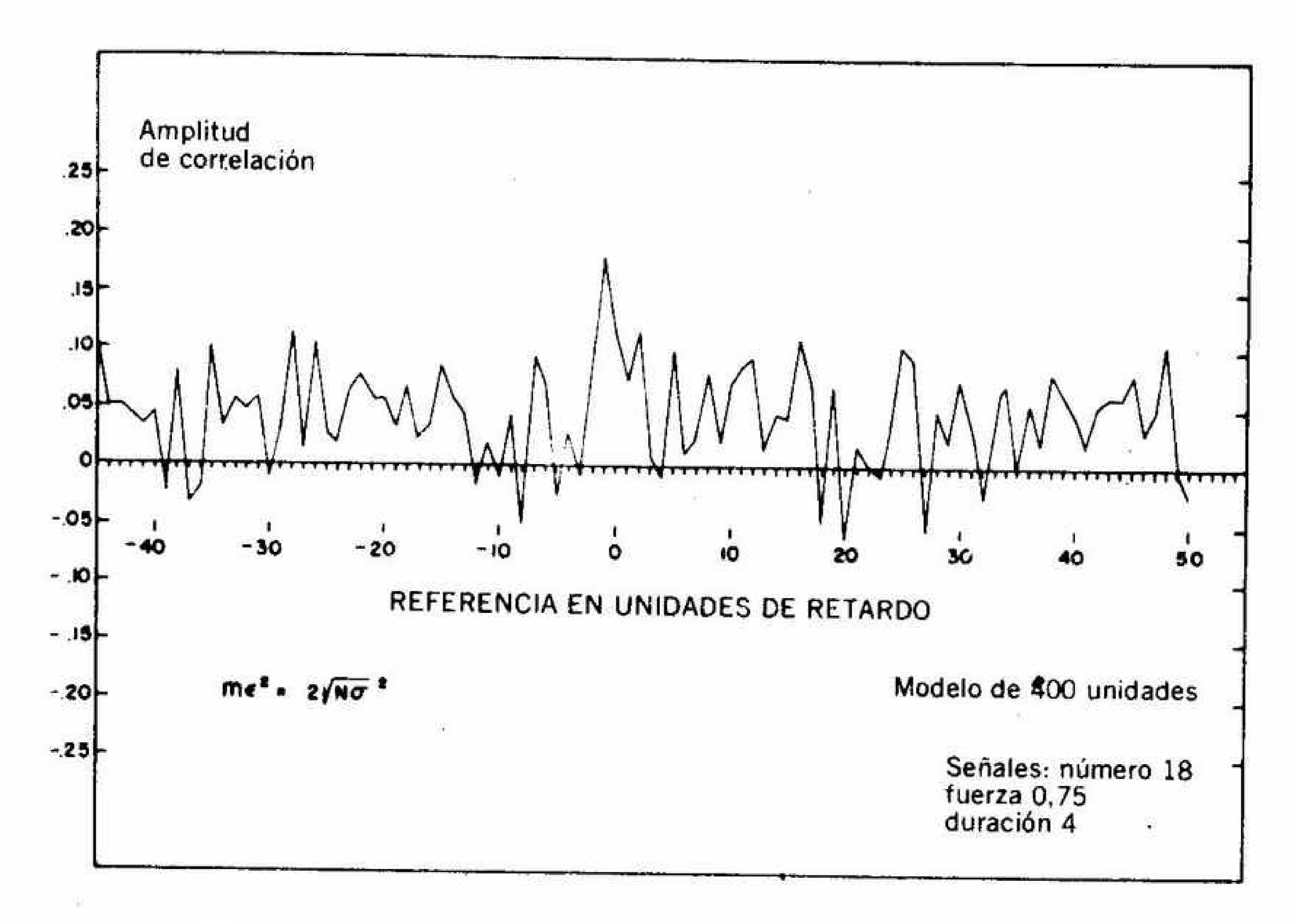


FIG. 19. Página anterior: suma de dos registros simulados de radiómetro en los cuales se han insertado 18 señales de origen inteligente de igual intensidad. Arriba: función de correlación de los dos registros del gráfico anterior. El pico pronunciado en el punto 0 de referencia en unidades de retardo indica la presencia de señales reproducibles.

18 muestra la distancia y el número de estrellas dentro de esta distancia que pueden alcanzarse con el equipo terrestre existente, todo en función de la frecuencia de radio, infrarroja u óptica. Pueden observar el pico bien definido causado por los efectos sobre T_s; y debo mencionar que en relación con el sistema óptico utilizado aquí, la potencia del laser fue de 1 vatio. En este caso, R es el alcance en parsecs, y N es el número de estrellas dentro de esta distancia. Ven que incluso hoy en día podemos alcanzar ya 10^7 estrellas en las radiofrecuencias.

Es probable que actualmente existan lasers de 1 megavatio que elevarían en tres órdenes de magnitud los valores de las frecuencias ópticas, pero continuarían siendo cuatro órdenes de magnitud menos efectivos que los enlaces radio.

En esta fase del desarrollo del tema tuvo que plantearse un cierto realismo deprimente. Fue formulada la pregunta: ¿Qué sucede si todos escuchan y nadie emite? Esto desemboca en la consideración de que quizá sea necesario detectar las señales que otras civilizaciones utilizan para sus propios fines: es

decir, que hay que espiar. En tal caso puede haber muchas más señales, pero llegarán en general como radiación isotrópica, por lo que G_t ya no será 10^6 sino 1 y se perderá un factor de 10^6 para nosotros. En lugar de poder detectar señales, por ejemplo, desde 2 000 parsecs, sólo se podrán detectar desde 2 parsecs y no quedan muchas estrellas situadas tan cerca.

Se buscaron técnicas para superar esta dificultad. En la figura 19 les muestro una de ellas, un método para interrelacionar dos espectros independientes observados por un radiotelescopio desde un único lugar en el cielo. Pueden ver un modelo que contiene dos de esos espectros en los que hay 18 señales, señales débiles metidas dentro de un ruido gaussiano. La situación de las señales está indicada en la parte superior para que vean dónde están y para que vean que es imposible detectar la existencia de este conjunto de señales a partir de ese registro usual radiotelescópico. Sin embargo, si interrelacionamos los dos registros, vemos un pico distinto en el punto de desviación cero, y un pico así demuestra que está presente un conjunto de señales y por lo tanto una civilización. Se podría utilizar el análisis de Fourier para obtener una sensibilidad semejante en la detección de la existencia de una tal civilización.

Con estas técnicas se puede recuperar un factor de 100 en sensibilidad, pero esto deja todavía por cubrir un factor de 10^4 para alcanzar lo que podría conseguirse con señales de balizamiento voluntarias. Por lo tanto, si queremos utilizar el modelo seguro de espionaje para detectar civilizaciones tendremos que usar sistemas receptores realmente enormes, examinar todo el espectro de radio disponible y recurrir a un complicado análisis por computadora. Es evidente en este punto que una búsqueda segura y efectiva ha de observar muchas frecuencias con una superficie colectora enorme.

¿Hay alguna esperanza de desarrollar un criterio que nos diga dónde mirar el cielo, a fin de acelerar la búsqueda? La suposición a priori consistiría evidentemente en observar las estrellas más próximas. Sin embargo, actualmente entendemos nuestra situación en la estructura del universo de un modo que desemboca en un modelo en el cual quizás no sea éste un procedimiento correcto. El doctor Kardashev se refirió a esto al señalar que podría existir realmente una población de emisores de radio muy intensos de las civilizaciones llamadas tipo II y tipo III. Estos emisores pueden ser más detectables que civilizaciones vecinas como la nuestra y por lo tanto no habría razón para observar las estrellas más cercanas. Es posible cuantificar este concepto, y la figura 20 contiene una descrip-

Si n(P) = número de ETI detectables de potencia P en el intervalo dP y si $\rho(P)$ = densidad espacial de ETI detectables de potencia P en el intervalo dP y si S_{min} = densidad de flujo mínima detectable,

$$\text{entonces} \quad \boxed{n(P) = \rho(P) \cdot \frac{S_{min}^{-3/2}}{6\pi^{1/2}} \; P^{3/2}}$$

$$\text{Si} \quad \rho(P) = KP^{-\alpha}, \text{ entonces } \frac{n(P_2)}{n(P_1)} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{3/2-\alpha}$$

$$\frac{N_{P>P_1}}{N_{P<P_1}} = \frac{\int_{P_1}^{\gamma P_1} n(P)\,dP}{\int_0^{P_1} n(P)\,dP} = \boxed{\frac{\gamma^{5/2}-1}{1}}$$

$$>1 \text{ si } \gamma^{5/2-\alpha} > 2$$

$$\text{o sea } \boxed{\alpha < 5/2}$$

$$\text{Ejemplo: si } \alpha = 5/2, \; \frac{P_2}{P_1} = 10, \; \frac{\rho(P_1)}{\rho(P_2)} \approx \underline{\underline{300}}$$

FIG. 20. Relaciones que afectan a la distribución de inteligencias extraterrestres (ETI) y que muestran las circunstancias que permitirían a las civilizaciones más distantes ser las de más fácil detección. Ver más detalles en el texto.

ción matemática de este concepto. Es una versión ligeramente diferente del mismo resultado obtenido por Kardashev y por Von Hoerner, porque fija un límite superior para la potencia que una civilización podría emitir. Como se ha sugerido en esta discusión, el límite probablemente existe. Hay que decir que esta formulación es válida para una distribución de la potencia emisora según una ley potencial, lo cual, como es lógico, puede no ser una representación acertada de la distribución real de la potencia.

Se obtiene el resultado realmente sorprendente de que α, el exponente, puede llegar hasta 2,5 y continuar siendo las civili-

zaciones distantes más detectables que las próximas. El número de civilizaciones puede disminuir según la potencia 2,5, y las civilizaciones más brillantes y más distantes se verán antes que las próximas. Esto es precisamente lo que sucede con las radiogalaxias. Como un ejemplo de esta fórmula pueden ver el caso de $\alpha = 2,5$. Entonces si por cada 300 civilizaciones de una potencia dada sólo hay una que disponga de diez veces esta potencia, las civilizaciones más distantes y más poderosas serán las primeras en detectarse. Este resultado es sorprendente.

La conclusión vuelve a ser desfavorable, porque no nos da motivaciones sólidas para observar las estrellas más próximas o de hecho cualquier punto concreto. Aunque disponemos del poder para descubrir civilizaciones no sabemos dónde mirar ni con qué frecuencia.

Bueno, hay una situación favorable, y es que realmente parece que sabemos cómo descifrar por lo menos algunas formas de mensajes, como se ha dicho ya en muchos lugares.

Las conclusiones generales en relación a los enlaces de radiación electromagnética son las siguientes: la búsqueda de señales de balizamiento se efectúa de modo fácil y eficiente con el equipo actual, aunque se precisa un tiempo de búsqueda mucho mayor. Una búsqueda razonable en el modo de escucha furtivo o una búsqueda de balizas muy débiles requiere antenas mucho mayores de las que disponemos actualmente. Puede considerarse razonable la idea de que una búsqueda bien planeada, automatizada y prolongada permitirá investigar con éxito señales de radio de otras civilizaciones. Pero creer que esta búsqueda tendrá éxito con recursos limitados y tiempo limitado no es más que un espejismo.

KARDASHEV: Estoy de acuerdo con muchos de los puntos que acaba de formular el profesor Drake. Lo más importante de todo es la cuestión de escoger la estrategia óptima en nuestra búsqueda.

Me gustaría hablar de esta estrategia y de los pasos necesarios para hacerla óptima. Llamemos 1 a la estrategia del emisor y 2 a la estrategia del receptor. La estrategia debería organizarse a grandes rasgos de este modo: primero, habría que minimizar la energía necesaria para transmitir un bit de información. Segundo, habría que minimizar la interferencia en la vecindad de la parte emisora. Tercero, habría que minimizar el coste del aparato receptor. Cuarto, es deseable una relación señal-ruido mayor que la unidad, teniendo en cuenta

las condiciones de propagación de ondas en el medio interestelar. Y, finalmente, un punto que me gustaría mucho recalcar: hay que minimizar el tiempo total.

El último punto no ha de estipularse, pero es evidentemente un factor limitador. Está muy claro, como dijo el profesor Morrison, que sería racional producir una señal de llamada especial que pudiese distinguirse, señales que serían claves para descifrar y decodificar la información, señales que harían referencia al lenguaje de la información, y señales que contendrían la información en sí.

Las estrategias óptimas para cada uno de estos casos parece ser que difieren. Tenemos que hablar ante todo de las señales destinadas a atraer nuestra atención. Es evidente que estas señales de baliza han de ser extremadamente redundantes en función de la relación de Shannon de la teoría de la información y han de satisfacer los cinco puntos que he mencionado.

Me parece que en el momento actual el caso que mejor satisface todos estos puntos es el de impulsos raros de potencia muy grande. No hay problemas de búsqueda de frecuencia si la amplitud de banda corresponde a $\Delta\nu \approx \nu$. La duración de los impulsos y su potencia van a ser tratadas en seguida.

¿Cuál ha de ser el modelo de la parte emisora si desea transmitir un bit de datos por un impulso de redundancia muy grande? Si partimos del actual nivel tecnológico de la Tierra, la mayor potencia a la que podemos recurrir es la producida ya en condiciones terrestres: a saber la energía de la máxima explosión producida en la Tierra, del orden de 10^{24} ergios. Como ha dicho recientemente Sterling Colgate,* una explosión poderosa puede transformarse en impulsos electromagnéticos de igual potencia. ¿De qué modo? Si se tiene un campo magnético dipolar enlazado a una estrella o a algún cuerpo artificial (Colgate examinó el caso de una supernova), el campo magnético experimenta en la explosión una rápida deformación y la energía cambiante del campo electromagnético produce la emisión de un único y potente impulso. Si hablamos de condiciones reproducibles, en principio podemos coger algunos campos externos, como el campo magnético terrestre o solar; si podemos situar la explosión aquí, el resultado será una deformación del campo magnético, y la deformación de este campo magnético producirá un impulso electromagnético único muy

* S. COLGATE y P. NOERDLINGER, «Coherent Emission from Expanding Supernova Shells», *Astrophysical Journal*, 1971, pp. 509-522.

potente. El espectro de este impulso ha sido calculado por Colgate y está en el espectro de radio. El espectro depende de parámetros específicos del campo magnético y la duración de la ráfaga puede regularse.

De este modo podemos considerar la cantidad de 10^{24} ergios como un límite, una frontera donde acaba nuestra capacidad tecnológica para transmitir un bit de datos. Ésta es la frontera actual.

El doctor Drake ha hablado de las dificultades formidables que se presentan al buscar el intervalo óptimo de longitudes de onda astronómicas. Quisiera añadir a ello las dificultades derivadas de la incertidumbre de la estrategia. El primer tipo de estrategia para establecer comunicación podría ser el siguiente: supongamos que hay un transmisor isotrópico y un receptor que también actúa isotrópicamente. En esta estrategia no hay un acuerdo previo entre los corresponsales y no son conscientes de la existencia del otro.

En una segunda estrategia, la parte transmisora actúa isotrópicamente, pero nosotros, la parte receptora, hemos seleccionado por alguna razón un ángulo sólido que consideramos especialmente prometedor. La recepción en este caso sigue un haz. El haz puede quedar determinado por la precisión con que conocemos las coordenadas de la estrella o las dimensiones angulares del sistema planetario; o por el error que sabemos que existe en estas coordenadas. Esto significaría también que tenemos los medios para construir un gran radiotelescopio con una forma de antena altamente anisotrópica.

Puede haber también un caso tercero y un caso cuarto: el tercero será el inverso del segundo, y en el cuarto caso ambas partes conocen las coordenadas del otro y dirigen sus aparatos hacia allí. Todos estos casos pueden calcularse mediante la teoría de comunicaciones actual y en cada caso obtendremos un intervalo o espectro óptimos.

Hay también dificultades producidas por el hecho de que la parte receptora puede construir su sistema isotrópico de un modo diferente. Para la recepción isotrópica podemos utilizar una simple antena dipolo o podemos utilizar un número gigantesco de espejos parabólicos que cubran todo el cielo. El coste de estos dos experimentos diferirá en varios órdenes de magnitud. Hasta que todos estos cálculos estén listos, tendremos que tener en cuenta el ruido de fondo, el ruido de la estrella cerca de la cual están los planetas. En cada uno de estos casos hay un intervalo óptimo de frecuencias.

El caso más interesante es aquel en el que imaginamos un experimento simple. El emisor y el receptor utilizan las antenas más sencillas, dipolos, y entonces podemos resolver nuestro problema en términos estrictos y obtener la energía aproximada necesaria para transmitir un solo bit.

Actualmente y gracias a los púlsares hemos estudiado muy bien la propagación de las ondas de radio en el medio interestelar. Los radioastrónomos están muy familiarizados con el hecho de que en la propagación de un impulso de radio a través del medio interestelar el medio produce una dispersión y causa una extensión del pulso en el tiempo, un ensanchamiento de su espectro, y en algunas frecuencias un desvanecimiento del pulso. Todo esto afecta la duración óptima del pulso y la amplitud de la banda. Podemos calcular todas estas condiciones de modo que estemos seguros de no perder ningún pulso y de poder preservar todas las condiciones de coste mínimo aludidas anteriormente. En el caso más simple, parece que el mínimo decimétrico de longitud de onda en el fondo resulta ventajoso, y un experimento de este tipo podría ser muy barato (les daré después una estimación aproximada del coste). Puesto que éste es el tipo de experimento más sencillo, debería dársele prioridad. Pueden hacerse cálculos similares para casos más complicados y en todos los demás obtenemos, como es natural, resultados diferentes.

La radiación de fondo del cielo se ha estudiado prácticamente en todas las partes del espectro, excepto en el infrarrojo lejano. El infrarrojo lejano también puede ser óptimo. Su carácter óptimo puede relacionarse con el hecho de que la dispersión en el medio interestelar y, por lo tanto, el desvanecimiento del pulso y su extensión en el tiempo son insustanciales en este caso.

Podemos construir un sistema similar isotrópico en forma de un bolómetro, en el caso más simple en forma de esfera, que mida su propio cambio de temperatura debido a la radiación incidente. Un sistema así puede resultar también atractivo para la comunicación a larga distancia. La ventaja física de un bolómetro reside en que con radiación isotrópica y una antena dipolo, la superficie colectora es proporcional al cuadrado de la longitud de onda. Por ello las ondas cortas son desventajosas. En cambio, si utilizamos un sistema bolométrico, por ejemplo una esfera, su superficie no depende de la longitud de onda y puede resultar que la parte de onda corta sea más ventajosa. Los cálculos demuestran que todo depende de la radiación de fondo infrarroja. Si la intensidad mínima del fondo en el infrarrojo resulta tan baja como en la parte de radio

TABLA 2

PARÁMETROS DE VARIOS MODOS DE COMUNICACIÓN INTERESTELAR POR RADIO

Tipo de comunicación	R Distancia en centímetros	Δt Amplitud (debida a la dispersión) en segundos	W Energía del pulso en ergios	P_m Potencia media en ergios / segundo	P_p Potencia de pico en ergios / segundo
Emisiones de Bracewell hacia nuestro sistema planetario, $\lambda = 21$ cm, ganancia de antena $G_1 = G_2 = 1$	3×10^{13} (2 u.a.)	10^{-7}	10^{15} (10^8 J)	10^{10} (1 kw)	10^{22}
Contacto de antena dirigida con las estrellas más próximas, $\lambda = 21$ cm, diámetros de antena $D_1 = D_2 = 200$ m	10^{19} (10 a.l.)	3×10^{-4}	10^{15} (10^8 J)	10^{10} (1 kw)	3×10^{18}
Emisión isotrópica del núcleo galáctico, $\lambda = 5$ cm, $G_1 = 1$ antena receptora con un $D_2 = 100$ m	3×10^{22} (3×10^4 a.l.)	1	10^{33}	10^{28}	10^{33}
Contacto de antena dirigida con la galaxia de Andrómeda, $\lambda = 21$ cm, $D_1 = D_2 = 10$ m	2×10^{24} (2×10^6 a.l.)	3×10^{-2}	10^{32}	10^{27}	3×10^{33}
Emisor distante metagaláctico, isotrópico, $\lambda = 21$ cm, $G_1 = G_2 = 1$	10^{28} (10^{10} a.l.)	30	10^{48}	10^{42}	3×10^{46}

Adoptamos en esta tabla una amplitud de banda $\Delta\nu = \nu$, un intervalo de repetición de los pulsos de un día y una relación señal-ruido de 10^3.

del espectro, el intervalo submilimétrico puede resultar más ventajoso que el de radio.

Mi segundo ejemplo se refiere a los cálculos para hacer óptima la estrategia de observación del centro de la Galaxia. Supongamos que hacemos una antena con un haz correspondiente al diámetro angular del centro de la Galaxia, unos 2 minutos de arco. En este caso el ruido que determina la estrategia es un espectro de la emisión radio del centro de la Galaxia y la emisión de fondo no juega ningún papel. Entonces, si tomamos el valor real del flujo de densidad del centro galáctico, vemos que la longitud de onda óptima es de 5 centímetros. La energía mínima para la transmisión isotrópica de un bit es de 10^{33} ergios. Estas condiciones pueden satisfacerse si la antena receptora en tierra tiene una superficie efectiva de 6 000 metros cuadrados. Esto sería un plato de radiotelescopio de 100 metros de diámetro (tabla 2). Tales cálculos pueden efectuarse para cualquier fuente, y, como es lógico, darán valores diferentes. El intervalo óptimo para fuentes muy compactas que tienen el mismo flujo que el centro galáctico se desplazará de nuevo dentro de la parte de corto alcance del espectro. Los parámetros para todo un conjunto de varias circunstancias de comunicaciones aparecen en la tabla 2.

Antes de sacar de todo esto las necesarias conclusiones, me gustaría decir que las conclusiones referentes a la longitud de onda óptima para transmitir la información real pueden hacerse más definidas si suponemos de nuevo una fuente de señales no relacionada con cualquier otra fuente de radio potente. En este caso todo dependerá de la estrategia adoptada en el aparato receptor. Pero los cálculos que tienen en cuenta las fluctuaciones y el fondo demuestran que en los casos límites la banda de ondas óptima ha de corresponder con la intensidad mínima del fondo o bien, en el caso de que dispusiéramos de una sola antena grande, la mejor región estaría alrededor de los 2 milímetros.

Unas pocas palabras sobre las potencialidades de la escucha furtiva: me gustaría mostrarles a grandes rasgos el espectro del ruido generado en la tierra actualmente en una banda amplia de ondas. La estructura general es la de la figura 21. Las longitudes de ondas están trazadas logarítmicamente y la potencia total del transmisor está dada por herzio: la escala también es logarítmica. Aparecen los datos de todas las instalaciones transmisoras registradas en Ginebra por la Unión Científica Internacional de Radio. La Unión dispone de datos que indican el crecimiento con el tiempo del espectro. Si lo

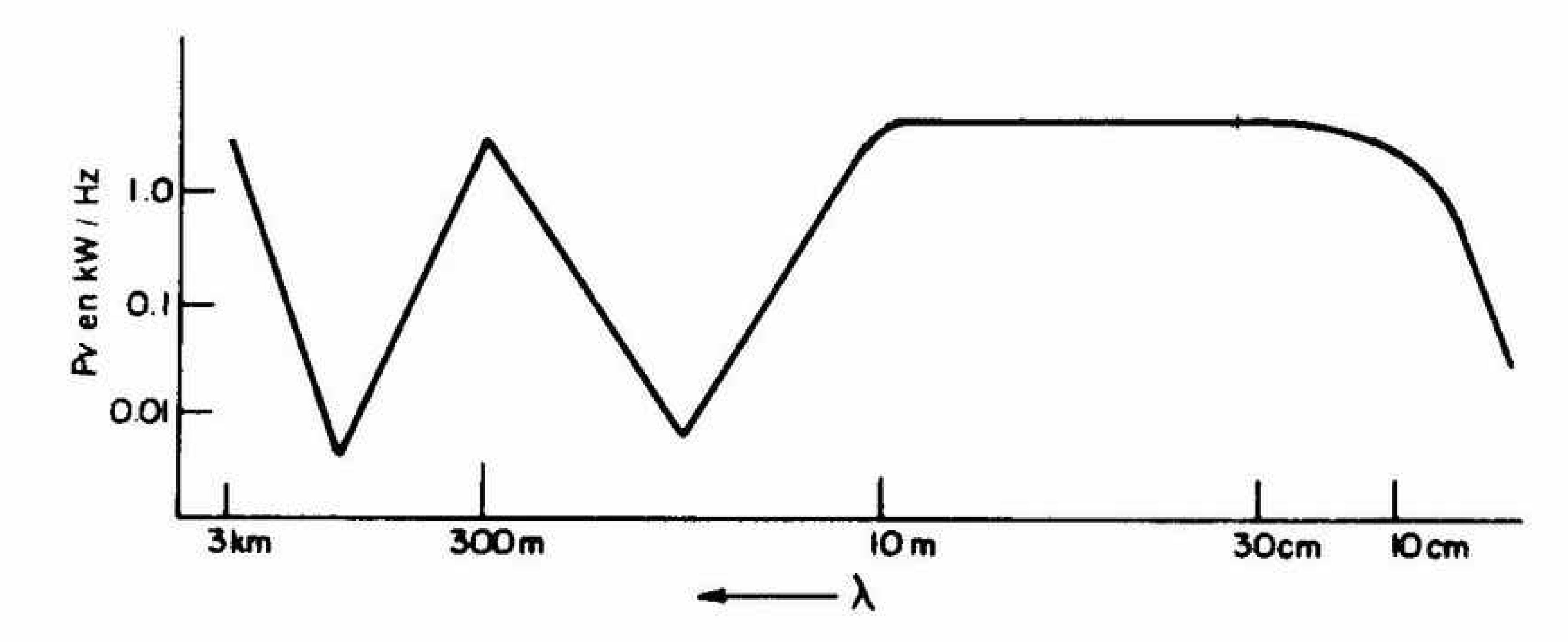


FIG. 21. Estimación aproximada de la generación de ruido de radio en banda ancha en el planeta Tierra en la época actual. Las ordenadas indican la potencia en kilovatio por herzio, y las abscisas, la longitud de onda aumentando hacia la izquierda. La curva representa la integrada de todas las instalaciones transmisoras registradas por la Unión Internacional de Radio científica. Hay también otras instalaciones.

integramos todo para obtener la potencia total, resultará superior a la potencia real de que dispone la raza humana. Esto significa que la mayoría de las instalaciones transmisoras no están en uso. Por otra parte, como es lógico, hay algunas que no están registradas. Muchas funcionan durante un período muy breve.

Hasta la longitud de onda de 30 centímetros, la potencia total por herzio supera la potencia total por herzio emitida por el Sol. Un observador exterior podría apreciar una emisión de radio más potente de la Tierra que del Sol en calma. Sin embargo, se trata de una cantidad absoluta muy pequeña, y los radioastrónomos no han podido observar tales emisiones de radio de las estrellas más cercanas. Las antenas necesarias para una emisión así de estrellas situadas dentro de 10 años-luz han de tener una superficie de unos 10^6 metros cuadrados. Creo que estos datos demuestran que el problema de la escucha furtiva es algo muy realista en que trabajar.

Me gustaría finalmente decir algo sobre el coste de tal proyecto en un futuro muy próximo. Primero, la propuesta más barata: llamémosle la propuesta de las dos islas. Se trata de instalar dos estaciones con receptores de alta sensibilidad y antenas dipolo. Los puntos se han de escoger muy cuidadosamente para que correspondan a un mínimo de interferencia terrestre. Confío que en los próximos años se puedan encontrar tales puntos. En cinco o diez años se habrá hecho probablemente imposible debido a la potencia de las instalaciones

emisoras, que según las estadísticas se duplica cada cinco años. (Es especialmente importante la emisión desde los satélites terrestres.)

El tipo de dispositivos receptores a utilizar estará determinado completamente por el fondo del cielo, representado también de modo aproximado en la figura 22. Existe un máximo en la emisión de ese fondo situado en algún punto próximo a los 50 centímetros, y hay una región inexplorada en longitudes de onda inferiores a 1 milímetro. También puede presentar depresiones profundas. Se trata de un problema separado que se está estudiando actualmente en astrofísica. Pero lo que ahora puede hacerse es establecer un sistema isotrópico en la región de fondo de radio mínimo, y quizá después en otras frecuencias. Si hay dos puntos de recepción, la selección cohe-

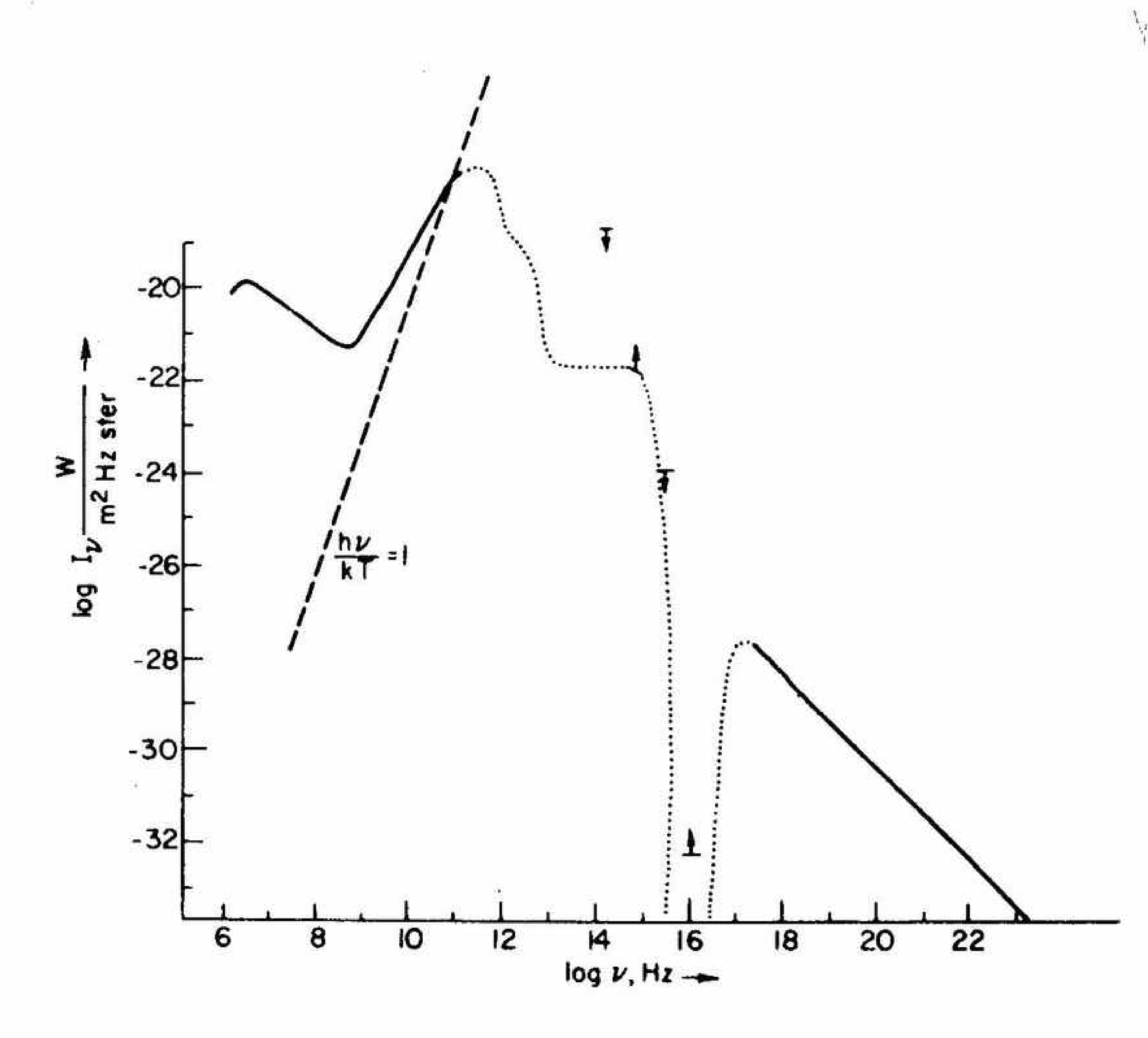


FIG. 22. Representación aproximada del fondo del cielo. Las frecuencias de radio están indicadas por la curva continua de la izquierda, las frecuencias ópticas por la curva continua de la derecha. El amplio intervalo intermedio de ondas infrarrojas, que debe de presentar depresiones, precisa de observaciones por encima de la atmósfera.

rente nos permitirá determinar si estamos recibiendo interferencias o una señal del espacio.

Este problema es de tipo astrofísico. He hablado del artículo de Colgate donde predice que de este modo quizá sea posible detectar explosiones de supernovas incluso en otras galaxias. Sería ideal, desde luego, cubrir todo el espectro radio, pero resultaría algo caro. El coste de un experimento así sería de aproximadamente un millón de rublos o de dólares para las dos estaciones.

SHKLOVSKY: Eso sería muy barato.

KARDASHEV: Hablo del coste sin una antena, un sistema dipolar. Sin duda podrían proponerse experimentos mucho más costosos que exigirían la construcción de antenas muy grandes. He hablado sobre el hecho de que la detección, por ejemplo, de la emisión de radio de nuestra civilización desde una distancia de 10 años-luz requeriría una antena cuyo tamaño fuera de un kilómetro cuadrado. Este sistema es también muy deseable en otras bandas de onda. Ha de costar, evidentemente, lo mismo que otras antenas, pero tendrá una superficie proporcionalmente más pequeña. Es muy deseable construir un telescopio de esta clase.

PANOVKIN: Una pregunta a Kardashev. No he acabado de entender en qué sentido utilizaba usted la palabra «estrategia». Observo que usted está hablando de diversos casos variables para diferentes objetivos y modos diferentes de transmisión y el problema de calcularlos correctamente. Sin embargo, una cuestión de estrategia es muy importante. Se trata de planificar la operación, de saber pasar de una variante a la otra; tales casos se excluyen y permiten variar la planificación de la operación. Está también el interés teórico que representa planificar una operación en función de una estrategia de juego de dos civilizaciones que descubren que una posibilidad no es realista, pasan a la siguiente, etc.

KARDASHEV: Como es lógico, yo me refería únicamente a una estrategia en función de experimentos que pueden montarse en el futuro próximo. Eso es todo.

PANOVKIN: Repito que esto no es una estrategia.

MORRISON: Una pregunta al doctor Kardashev. Es realmente muy interesante oír una exposición tan clara y simple del problema, especialmente porque estoy totalmente de acuerdo en que necesitamos separar de modo muy claro el problema de la adquisición de la señal del problema de recibir un mensaje extenso. Por otra parte me gustaría plantear la siguiente cuestión: supongamos que imaginamos un universo absolutamente nublado, donde la radiación electromagnética de todas las frecuencias no llega a ser absorbida, pero sí se ve dispersada al azar: ¿no sería su propuesta exactamente adecuada para un caso así? De ser esto cierto, como así lo creo, me parece que desecha con su propuesta nuestro extenso conocimiento de la geografía del universo. Aunque, desde luego, no podemos predecir la mejor localización de las transmisiones.

GINZBURG: En otras palabras, ¿para qué necesitamos un dipolo? ¿Está pensando en una explosión?

KARDASHEV: ¿Que por qué necesitamos usar un dipolo en el primer experimento? Sólo porque es el experimento más sencillo y hasta ahora nadie lo ha llevado a cabo. En la actualidad se generan tantos pulsos en la Tierra que la radioastronomía se ha retrasado. Ha perdido el barco que le permitiría recibir estos pulsos del espacio exterior y por lo tanto es necesario un sistema especial consistente en dos o más estaciones que operen coherentemente para seleccionar los pulsos y decidir si pueden proceder del espacio exterior o de la Tierra.

No estoy pensando solamente en una explosión. Cualquier tipo de generación nos conviene, pero utilicé el ejemplo de la explosión porque podíamos ponerlo en práctica incluso nosotros.

DRAKE: Creo que desde hace unos años ha funcionado una red de estaciones en el Reino Unido buscando pulsos semejantes, y hasta ahora no ha descubierto ninguno.

¿Dispone de alguna estimación sobre la eficiencia de la conversión en emisión electromagnética de la energía generada en la explosión de una bomba de hidrógeno mediante el sistema que acaba de explicar? Esta eficiencia es bastante importante.

KARDASHEV: Según la idea de Colgate, se pueden convertir en un solo impulso varias decenas por ciento de la explosión.

SAGAN: James Elliott, de Cornell, preparó un breve trabajo sobre las explosiones nucleares y CETI para esta reunión. Obtiene las siguientes conclusiones (se describen con más detalle en el apéndice H). La explosión termonuclear Starfish, a la que Elliott atribuye una potencia de 1,4 megatones, podría haberse detectado con los detectores de rayos X actualmente en uso desde una distancia al Sol de 400 unidades astronómicas. Se pregunta también qué sucedería si todas las armas nucleares almacenadas por los Estados Unidos, la Unión Soviética y otras naciones fueran detonadas simultáneamente con ese objetivo –por ejemplo, en el espacio o en la otra cara de la Luna–. (Una iniciativa de este tipo parece deseable a parte totalmente de la comunicación interestelar.) Formula una conjetura sobre el contenido de esas reservas y supone que el pulso de rayos X podría concentrarse de algún modo dentro de un haz cónico con un semiángulo de 30 grados; calcula entonces que la distancia a la cual podría detectarse el pulso es de unos 190 años-luz. Si la civilización receptora no estuviera vigilando en aquel instante todo habría acabado. No parece que sea un método muy eficiente.

GOLD: De vez en cuando he estado pensando en la posibilidad de construir un transmisor que utilizara explosivos, quizás explosivos nucleares, pero que fuera un transmisor en el cual se pudiese enfocar la explosión y obtener una señal continuada con un espectro de frecuencias considerablemente restringido en lugar de una simple función delta en el tiempo sobre todas las frecuencias. Un tal aparato puede tener la forma de estructuras periódicas en las que los campos magnéticos existen inicialmente y las estructuras periódicas son eliminadas a medida que la onda explosiva las va recorriendo. De este modo puede obtenerse una señal periódica que avanza, como es lógico, a la velocidad de la luz. Pensé luego que lo mejor sería coger estos aparatos, capaces quizá de producir en un pulso una energía del orden de 10^{20} ergios, y ponerlos en una especie de gran disco delgado de Mylar en el espacio; el disco, como es lógico, quedaría destruido por la explosión, pero serviría para dirigir el pulso en la dirección deseada.

OLIVER: Cualquier sistema destinado a atraer la atención que se funde en un corto impulso ocasional, reduce mucho la L de la ecuación (1). Por ejemplo si utilizamos todas las bombas nucleares del mundo para atraer la atención de otra civilización, lo cual podría ser el mejor uso para estas bombas, L sería entonces más o menos del orden del microsegundo.

GINZBURG: Me gustaría decir que en mi opinión las explosiones nucleares son completamente inadecuadas. Esto se ha dicho ya y no voy a detenerme más en ello. Sólo quiero preguntarle lo siguiente al doctor Kardashev: Si hay transmisores en civilizaciones del tipo I, transmisores corrientes y potentes, ¿se puede detectar algo con un dipolo? ¿Sirve de algo su dipolo con transmisores potentes sin explosiones, si eliminamos las explosiones que son muy difíciles de controlar?

KARDASHEV: El doctor Drake habló antes sobre la posibilidad de utilizar aparatos de radar y demostrar que en 10 kiloparsecs sería posible establecer contacto con una antena dipolar. Pero a mí no me parece tan terrible el uso de las explosiones para transmitir impulsos. El principio es muy simple: se crea, por ejemplo, en un período de un año un campo magnético fuerte sin ninguna explosión. Se pasa una corriente por una bobina, se crea un campo y cuando se necesita se hace el cortocircuito. La autoinductancia del sistema está calculada y se obtiene así un corto impulso. Este sistema serviría especialmente para emitir un impulso. Me parece muy realista.

GINZBURG: ¿El dipolo serviría sólo para eso? Entiendo.

TOWNES: Uno de los criterios que se ha dado de lado en esta discusión es la importancia de la comunicación bilateral. Creo que esto afecta en gran medida a muchos de los argumentos sobre el alcance. Yo estaría mucho más interesado en aprender algo sobre la vida de una estrella a 5 o 10 años-luz de distancia, de modo que durante mi vida hubiera alguna posibilidad de comunicarse que en dar con una a 100 000 años-luz. Hay muchas técnicas que permiten con bastante facilidad (por lo menos a nuestra escala) comunicarse hasta unos cuantos miles de años-luz y hay muchas estrellas dentro de esta distancia. Creo que habría que poner mucho énfasis en la búsqueda razonablemente barata y constante de estas estrellas próximas.

SAGAN: No hay duda de que todo programa racional debería incluir estrellas próximas. Sin embargo, hay dos puntos que me gustaría recalcar. El primero es que no se pueden tener simultáneamente civilizaciones próximas a nosotros en el espacio y próximas en el tiempo; ésta es una consecuencia simple de la ecuación (1). Una civilización que esté cerca de nosotros en el espacio estará estadísticamente muy lejos de nosotros en el tiempo. El hecho de que una civilización avanzada esté

situada cerca de nosotros en el tiempo implica que las civilizaciones son algo corriente, y por lo tanto que tienen una duración media larga. Por lo tanto, cualquier civilización escogida al azar sería muy antigua. Sospecho que las civilizaciones muy antiguas no son las que tratarán de entrar en contacto con nosotros (ver páginas 209-210).

El segundo punto es que si usted cree que hay civilizaciones dentro de los 10 o 20 parsecs más próximos, adopta para las varias F de la ecuación (1) valores mucho más optimistas que los míos.

DRAKE: Deseo aclarar la idea del doctor Townes. Si $\alpha > 5/2$ (figura 20) no importa a qué parte del cielo miremos. Si $\alpha < 5/2$ sólo cuentan las estrellas próximas. Si uno observa las estrellas próximas, la búsqueda será adecuada para ambos casos, pero uno no ha de engañarse pensando que al actuar así aumenta las probabilidades de éxito.

VON HOERNER: El exponente en la función de distribución de Drake determina si deberíamos buscar de una vez por todo el cielo o sólo estrellas individuales. En el primer caso desearemos una resolución muy baja, en el segundo una elevada resolución. Por lo tanto, si construimos un gran sistema de telescopios individuales, en el primer caso deberá ser muy compacto, y en el segundo, ampliamente disperso.

SHKLOVSKY: Creo que Kardashev pensaba también en esto: el establecimiento preferencial de contacto con una civilización del tipo II. En esa situación es importante subrayar la conveniencia de usar métodos interferométricos. Si utilizamos líneas bases largas y de este modo resolvemos diferencias angulares de 10^{-4} segundos de arco, y si consideramos que tal civilización tiene dimensiones características de una unidad astronómica, puede verse fácilmente que una civilización de este tipo se puede detectar fácilmente desde cualquier punto de la Galaxia. Podemos imaginar un sistema de espejos muy grandes dispersos sobre una distancia comparable al diámetro de la Tierra. Un sistema así sería muy efectivo.

MINSKY: No hemos encontrado una frecuencia natural única, pero hay que indicar que las antenas son caras y que los receptores son en potencia muy baratos. Quizá si imaginamos, por ejemplo, que la antena es un aparato espectroscópico que recoge toda la radiación y focaliza, por dispersión, frecuencias diferentes en puntos diferentes, podemos construir un millón de pequeños receptores semiconductores dispuestos a lo largo del diagrama de dispersión del telescopio. Me parece que si eso fuera un proyecto serio, cada receptor costaría sólo unos pocos dólares y con la linealidad del espacio y con un diseño adecuado, no tendrían que interferirse entre sí y podríamos disponer de un conjunto enorme de receptores baratos. Con un diseño adecuado puede imaginarse incluso la posibilidad de que un reflector grande de larga distancia focal forme una pequeña imagen de radio.

GOLD: ¿Se ha dado cuenta alguien de que existe la posibilidad de conseguir un canal de comunicación con lo que suele denominarse el modo silbante a lo largo de las líneas del campo magnético de la Galaxia a frecuencias muy bajas, partiendo del exterior del sistema solar donde las densidades de plasma descienden al nivel galáctico? Tal sistema de comunicación tendría la ventaja de no estar sujeto a la atenuación del cuadrado inverso, porque la señal está guiada a lo largo de las líneas del campo. Si uno tiene la suerte de que haya alguien sentado en la misma línea de campo se tiene un canal con señales posiblemente muy poco atenuadas.

TROITSKY: Mi primer tema es la búsqueda de emisiones monocromáticas de estrellas situadas en la vecindad del Sol. Me propongo discutir la búsqueda de emisiones monocromáticas en las bandas de onda de los 21 y los 30 centímetros procedentes de estrellas a una distancia de decenas de años-luz. Examinamos doce objetos astronómicos distintos, especialmente estrellas del tipo espectral G. Esa investigación se basaba en la suposición de que la señal más adecuada, la de carácter más artificial, es la señal sinusoidal más pura.

La transmisión de información por una señal de este tipo es suficientemente lenta. Con objeto de recibirla, desarrollamos un receptor de banda estrecha para los 21 y los 30 centímetros, que permitió llevar a cabo observaciones simultáneas en 25 frecuencias. Las frecuencias estaban espaciadas entre sí 4 kiloherzios y ocupaban bandas de 13 herzios en el entorno de cada longitud de onda. Se intercambiaron uniformemente veinticinco filtros. Esto permitió examinar bandas de frecuencia de 2 megaherzios. El examen de este intervalo requirió 10 minutos.

La temperatura de ruido del receptor en ambas frecuencias era de unos 100° K. La recepción se realizó con una pequeña antena de 15 metros de diámetro en Gorki. La sensibilidad

TABLA 3
OBJETOS ASTRONÓMICOS EXAMINADOS CON VISTAS A LA COMUNICACIÓN INTERESTELAR EN GORKI

Objeto	Distancia en años-luz	Tipo espectral estelar	Número de observaciones
Epsilon Eridani	10,8	K2 V	6
Tau Ceti	11,9	G8 V	6
380 Ursa Majoris	14,7	dM0	2
Rho Coma Berenices	27,2	G0 V	7
Beta Canis Venaticorum	30,2	G0 V	7
Eta Bootis	31,9	G0 IV	6
Iota Persei	38,8	G0 V	4
47 Ursa Majoris	44,7	G0 V	10
Psi-5 Aurigae	48,6	G0 V	2
Pi' Ursa Majoris	50,2	G0 V	4
Eta Herculis	61,6	G8 III-IV	3
M3I (Galaxia de Andrómeda)	–	–	6

Fuente: V. S. Troitsky, A. M. Staurodubtser, L. I. Gershtein y V. L. Rakhlin, *Astronomicheskhii Zhurnal* 48, 1971, p. 645.

umbral del sistema para un flujo de una señal sinusoidal era de unos 2×10^{-22} vatios por metro cuadrado.

Las observaciones realizadas hasta el momento han afectado solamente a la longitud de onda de 30 centímetros en una banda de 2 megaherzios.

Las observaciones se realizaron en septiembre y octubre de 1968. La tabla 3 contiene la lista de los objetos investigados.

Llevamos a cabo sesenta y cinco sesiones de observación. Esto representó unas cinco sesiones por estrella en tiempos diferentes. Podemos decir que con una precisión de 2×10^{-21} vatios por metro cuadrado no observamos radiación monocromática en la longitud de onda de los 30 centímetros. Como ven, la experiencia fue similar al proyecto Ozma llevado a cabo por Drake, aunque los instrumentos diferían sensiblemente. Nosotros utilizamos un receptor radiométrico; un receptor corriente de resonancia.

Mi segunda comunicación se refiere a la búsqueda de emisiones esporádicas que podrían ser consecuencia de una actividad ETI; en otras palabras la posibilidad de detectar un pulso suficientemente potente, procedente del espacio exterior. Un modo de detectar ETI es buscar los resultados de sus obras de ingeniería. Uno de esos resultados podría ser la radiación electromagnética. Podemos suponer que esta emisión varía en el tiempo. Acaso se produzca una elevación esporádica de la

emisión, una elevación de duración diferente, o pueden aparecer impulsos de duración corta o larga: la duración puede variar.

De acuerdo con este concepto realizamos observaciones sobre toda la banda decimétrica. Utilizamos un radiómetro con una temperatura de ruido de 600º K en los 50, 30 y 16 centímetros, con un dipolo y un reflector. El lóbulo anterior de la antena dipolo apuntaba al cenit. Para distinguir la señal de señales espaciales de origen local se llevaron a cabo observaciones en diversos puntos simultáneamente. Las medidas se realizaron a partir de marzo de 1970 entre puntos dispersos en más de 1 500 kilómetros entre Gorki y Crimea. Se utilizó un instrumento registrador; en un minuto la cinta se movía a tal velocidad, que podíamos registrar simultáneamente acontecimientos con una precisión que llegaba a un segundo.

Las primeras medidas en los 50 centímetros mostraron fenómenos coincidentes, que ocurrían casi siempre de día. Era evidente que sólo se podrían obtener datos estadísticos después de prolongadas observaciones y que la naturaleza del fenómeno sólo podría determinarse cubriendo amplias zonas de longitud y latitud. Por lo tanto organizamos simultáneamente observaciones en cuatro puntos para los 50, 30 y 16 centímetros, espaciados meridionalmente sobre distancias de unos 1 500 kilómetros y separados por 8 000 kilómetros de latitud. Los instrumentos se situaron en Gorki, Crimea, Murmansk y la región del Ussuri en Siberia.

Las observaciones se llevaron a cabo durante dos meses desde el uno de septiembre al 12 de noviembre de 1970. Las condiciones fueron de dos días de observación y dos días sin observación. Observamos fenómenos que pueden dividirse provisionalmente en cuatro grupos. El primer grupo está formado por blips singulares que duraban decenas y centenares de segundos, y fueron observados sobre el fondo de las fluctuaciones instrumentales. La figura 23 muestra un ejemplo de ello. El tiempo está medido por las abscisas y la temperatura de antena por las ordenadas. Hay tres registros: Crimea, Gorki y Ussuri. Pueden observar varios acontecimientos coincidentes. Tenemos otros ejemplos similares. Éste es el primer carácter de los impulsos observados.

El segundo grupo de fenómenos es un aumento de la fluctuación parecido a una tempestad de ruido de diferente intensidad. El tercer grupo son los blips sobre el fondo de una tempestad de ruido. Se trata de un impulso de tipo periódico. Finalmente observamos un cuarto grupo, un cambio compara-

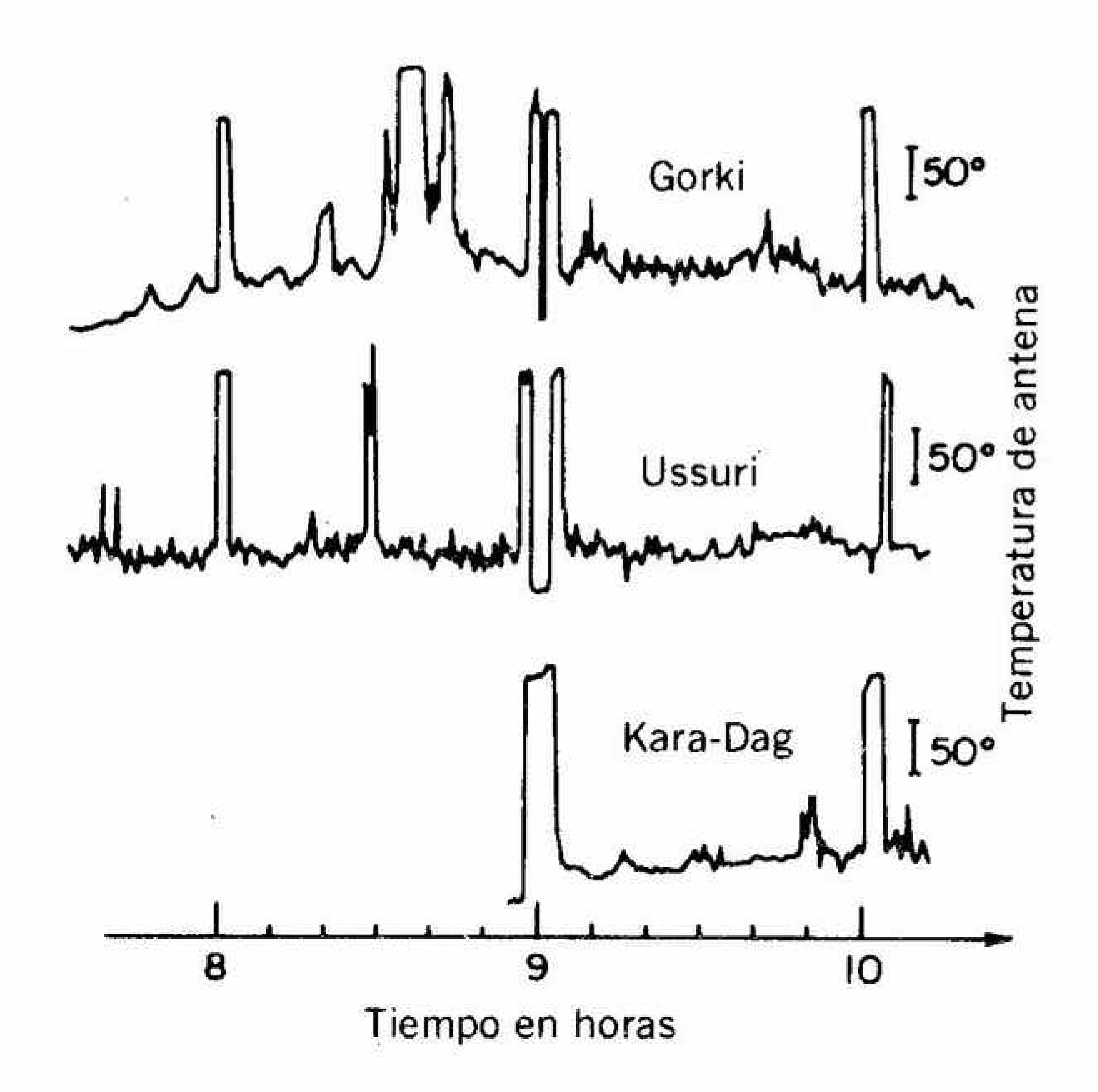


FIG. 23. Muestra diurna de la correlación de señales recibida por detectores isotrópicos en Gorki, en Siberia (Ussuri) y en Crimea (Kara-Dag). Obsérvese la correlación de acontecimientos.

tivamente prolongado en el nivel de emisión acompañado por unas fluctuaciones perceptibles, apreciables.

La elaboración de los datos consistió en determinar la característica estadística en cada punto y en buscar características coincidentes. Se comprobó que las partes coincidentes observadas eran muy superiores a la cifra casual, pero eso se observó principalmente de día. De noche las coincidencias eran menores y se aproximaban a las cifras casuales.

La existencia de estos acontecimientos coincidentes, el número de coincidencias por encima de los valores casuales indica que hay alguna razón global para estos fenómenos. Sin embargo, un análisis de la forma de estas curvas coincidentes y su asociación con el día sugiere que las emisiones de radio en cuestión no proceden del espacio exterior sino que parecen originarse en la atmósfera y pueden derivar en un análisis final de la actividad solar. Por lo tanto, el experimento no detectó ninguna emisión esporádica procedente de la Galaxia.

La experiencia conseguida en esta investigación sugiere que lo más expeditivo es buscar emisiones esporádicas galácticas en longitudes de onda más cortas, longitudes de onda

decimétricas y longitudes de onda centimétricas, probablemente en el intervalo de los 5 a 15 centímetros donde el efecto camuflante o de disfraz de las fuentes naturales de la Tierra es suficientemente bajo.

SAGAN: Hay que felicitar efusivamente al profesor Troitsky por el informe que nos ha presentado. Es el primer intento para realizar un experimento tipo Ozma después de Ozma, y el primero en casi una década del que hay noticias.

SAGAN (nota añadida en pruebas): Después de este simposio CETI han salido a la superficie dos intentos más para detectar señales de radio de civilizaciones extraterrestres; se llevaron a cabo con los telescopios de 140 pies y 300 pies de abertura del Observatorio Radioastronómico Nacional (NRAO) de Green Bank, Virginia occidental, donde se inició el Proyecto Ozma. Ambas experiencias utilizan la línea de 21 cm del hidrógeno y no se limitan a las señales sinusoidales. En el primer intento, por parte de G. Verschuur, se examinaron diez estrellas próximas (ver tabla 4). Los resultados se publicaron en *Icarus* 19 (1973): 329-340. El segundo intento, dirigido por B. Zuckerman de la Universidad de Maryland y por P. Palmer, de la Universidad de Chicago, está todavía en curso (mayo de 1973) y cuando haya finalizado habrá examinado ~ 200 estrellas. Ambos intentos han dado resultados negativos. Esto no resulta muy sorprendente. Según la discusión anterior (p. 168), inclu-

TABLA 4
ESTRELLAS OBSERVADAS CON VISTAS A LA COMUNICACIÓN INTERESTELAR EN EL OBSERVATORIO NACIONAL DE RADIOASTRONOMÍA

Estrella	Distancia en años-luz	Tipo espectral estelar
Barnard's Star	6,0	M5
Wolf 359	7,8	M8
Luyten 726-8	7,9	M6
Lalande 21185	8,2	M2
Ross 154	9,3	M6
Ross 248	10,3	M6
Epsilon Eridani	10,8	K2
61 Cygni A, B	11,1	K3, K5
Tau Ceti	11,9	G8
70 Ophiuchi A, B	16,4	K1, K5

Fuente: G. L. Verschuur, *Icarus* 19, 1973, pp. 329-340.

so con unos parámetros que algunos consideran optimistas, tenemos que examinar ~ 10^6 estrellas para tener una buena probabilidad de dar con una sola civilización extraterrestre. Por lo tanto, la probabilidad de éxito de todos los intentos hasta el momento es $\lesssim 10^{-4}$. Sin embargo, la utilización de las instalaciones radioastronómicas actualmente en existencia o en construcción puede aumentar en muchos órdenes de magnitud esta probabilidad.

GINDILIS: Empezaré hablando de algunos principios generales de un sistema CETI, la estrategia de CETI, y luego pasaré a un posible sistema de señales de balizamiento a base de impulsos con compresión en el medio interestelar.

Para concretar más, supongamos que estamos utilizando un canal electromagnético. El carácter específico de un sistema CETI es que ningún corresponsal conoce por anticipado lo que intenta el otro y sólo puede suponer la estrategia que los otros siguen; sobre esta base trata de coordinar sus acciones con las del corresponsal.

Por ejemplo, el receptor puede formular algunas suposiciones sobre el sistema de transmisión empleado por el remitente y sobre la base de estas suposiciones utilizará un cierto modo de recepción. A su vez el remitente ha de tener en cuenta los métodos de recepción que va a utilizar el receptor, y esto ha de hacerlo basándose en sus suposiciones sobre las acciones de su remitente. Esto desemboca en una situación de juego, una típica situación de juego. El rasgo específico del juego de comunicación interestelar –a diferencia de un juego entre los expertos de comunicaciones de ejércitos hostiles– es que los corresponsales, en lugar de intentar trastornar los planes mutuos, intentan dar conjuntamente con una solución del problema que les permita llevar el juego a buen término.

Facilita una solución de este problema el hecho de que hay un elemento común, que no depende ni del remitente ni del receptor. Este elemento es el enlace mismo de comunicación. Al decir enlace me refiero a la región del espacio cósmico entre el remitente y el receptor, entre sus antenas: el medio interestelar e interplanetario y las atmósferas planetarias.

Un estudio de los parámetros de este enlace permite sacar ciertas conclusiones sobre la posible disposición de este sistema o, por lo menos, sobre cómo no ha de disponerse. En primer lugar, podemos sacar conclusiones concretas sobre la longitud de onda óptima en CETI. Una vez conseguido esto, nos guiamos por algunas leyes objetivas y tratamos, a base de

tales leyes, de formular ciertas reglas de juego. Creo que estas reglas objetivas de juego deberían ser suplidas por una regla subjetiva y esta regla podría denominarse principio de menor incertidumbre.

Según este principio, cada participante en el juego, al hacer suposiciones sobre las acciones del otro participante (y partiendo de ciertas conclusiones prácticas), sigue la regla de reducir al mínimo la incertidumbre y, por lo tanto, de tener en cuenta sólo factores de principio.

No voy a entrar con detalle en ello, pero diré que al desarrollar un sistema CETI es natural escoger dos tareas (como ya se ha dicho): la transmisión y recepción de señales de faro y la comunicación de información. Hablaré solamente de las señales de llamada.

Pueden hacerse varias suposiciones concernientes al carácter de las señales de llamada y los requisitos que debe satisfacer un sistema de comunicación para su transmisión y recepción.

Primero, las señales de llamada están destinadas a facilitar la tarea de detección; concretamente, deben facilitar el establecimiento del carácter artificial de la fuente. Con tal fin, las señales, además de algunas características físicas, como su espectro y su estructura estadística, han de contener una cierta cantidad de información semántica. No discutiré el carácter de esta información semántica y me limitaré a discutir su cantidad.

A partir de ciertas consideraciones en las que ahora no voy a entrar, postulo que la cantidad de información en las señales de llamada CETI no es muy grande. Se deduce entonces que la capacidad transmisora de los canales para la transmisión y recepción de señales no es de crucial importancia.

Segundo, el sistema de codificación ha de ser lo más sencillo posible. Éstos son probablemente los rasgos más importantes de las señales, porque de otro modo no servirían para su fin. No hablaré de otras características de la señal.

En el caso general los corresponsales no saben nada sobre su posición respectiva en el espacio. Cuando el recipiente busca señales de llamada se enfrenta con una doble incertidumbre. No conoce ni la dirección ni la frecuencia de la señal que quiere recibir. El remitente ha de tenerlo en cuenta, puesto que dentro de los límites de su capacidad trata de facilitar lo más posible la tarea de detección. Digo «dentro de los límites de su capacidad» porque la estrategia de la búsqueda depende en gran medida de las potencialidades del remitente. Kardashev ha hablado brevemente sobre ello.

La tarea de detección se hace mucho más simple si el remitente utiliza una banda de paso lo más ancha posible $\Delta \nu \sim \nu$. En este caso eliminamos prácticamente la búsqueda de frecuencias en el extremo receptor.

Últimamente se ha generalizado el uso de impulsos comprimidos. Los impulsos comprimidos tienen un espectro amplio y una elevada potencia de pico. Eso hace que tales señales sean muy convenientes como señales de llamada CETI. La compresión puede efectuarse, en principio, o bien en el extremo transmisor o bien en el receptor, aunque resulta inútil condensar en el extremo emisor porque la propagación en el medio interestelar hará de todos modos borrosa la señal a causa de la dispersión, y se producirá una baja en el flujo de pico. Para poder comprimirla en la recepción final, el receptor ha de saber cómo proceder. Pueden superarse estas dificultades si utilizamos el medio dispersivo entre el transmisor y el receptor como un filtro con un retraso variable. Es evidente que en ese caso el retraso en la transmisión ha de ser de tiempo igual y opuesto a los retrasos que se producen en el medio interestelar.

En la figura 24 presento la dependencia del flujo con la distancia. Según sea el retraso en el extremo transmisor la emisión se enfoca en un punto u otro. A una pequeña distancia del punto de enfoque el flujo es proporcional a R^{-2}, exactamente como sería en ausencia del medio. Luego a una distancia igual a dos tercios del punto de enfoque la compresión gana en importancia y el flujo aumenta. Alcanza su máximo en el punto focal; luego baja rápidamente con la distancia desde ese punto; y a distancias mucho mayores el flujo declina según R^{-3}.

La línea de puntos que conecta los picos ilustra el hecho de que el flujo en los puntos locales cambie según la primera potencia de la distancia de estos puntos al transmisor. La semiamplitud del pico corresponde aquí a una mitad del flujo, y es independiente de la distancia; es igual a R_0, donde R_0 es la distancia a la cual en ausencia de retardos compensadores, el impulso se hace borroso por un factor de 2.

Este sistema de señales permite pasar de una señal de banda estrecha a otra de banda ancha con la misma potencia de transmisor y con la misma duración de las señales sin ninguna pérdida en la relación señal-ruido. Se supone que los impulsos llegan al receptor con gran relación de pulsos.

Si la posición de los corresponsales en el espacio no está predeterminada, el remitente ha de cambiar el enfoque y enviar una serie de pulsos que serán enfocados en diferentes distancias. De este modo, al eliminar una búsqueda de frecuencias

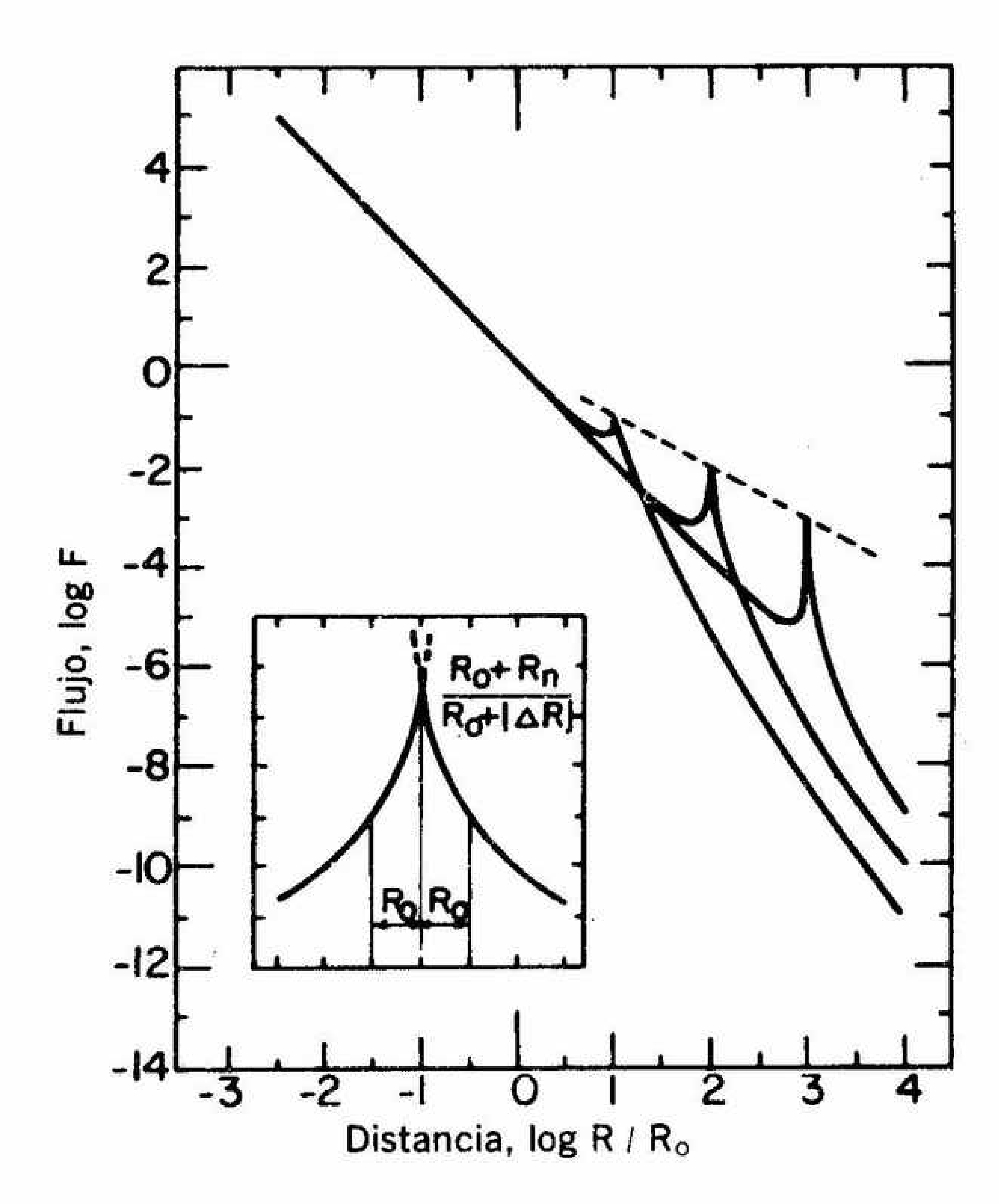


FIG. 24. Enfoque de una señal interestelar en un gráfico del flujo de radio en función de la distancia. Ver detalles en el texto.

en el extremo receptor nos vemos obligados a llevar a cabo una búsqueda de distancias en el extremo transmisor. Esta distribución de funciones en mi opinión se corresponde completamente con el fin de las señales de llamada, porque la iniciativa ha de estar en manos del remitente que trata de simplificar el trabajo de recepción a su corresponsal.

Supongamos que tenemos un caso de búsqueda de distancias. El remitente envía una serie de señales enfocadas en R_1. Envía luego otra serie de impulsos enfocados en $R_2 = R_1 + R_0$, y así sucesivamente hasta R_m. Entonces podemos preguntarnos: ¿Qué aspecto tendrá en este caso la señal en el punto de observación? A medida que el frente de enfoque se acerca al receptor, el recipiente detectará en algún punto una serie de pulsos. Estos pulsos indican un retraso normal de tiempo; los componentes de alta frecuencia llegan antes que los de baja frecuencia. El retraso temporal corresponderá a la distancia al

punto focal y no a la distancia al emisor. Si, por lo tanto, el recipiente trata de determinar la distancia a la fuente, encontrará un valor inesperadamente bajo. Al cabo de un tiempo llegará una nueva serie de impulsos cuya distancia mutua estará aumentada en una sola y única cantidad, y la duración de todos los impulsos declinará, como si la fuente se hubiese acercado al observador a una distancia R_0. Por lo tanto, el flujo de pico aumentará. Se observará un cambio similar de los parámetros de emisión tras períodos de tiempo sucesivamente decrecientes hasta que en algún punto el observador detecte una serie de pulsos con retraso nulo, y allí el pico alcanzará su máximo (figura 25).

En el momento siguiente, el observador registrará la misma serie de pulsos que se suceden tras intervalos temporales crecientes según la misma ley; la distancia entre los pulsos en cada serie nueva continuará aumentando; sin embargo, la duración de los pulsos, que hasta ahora disminuía, empezará a crecer, mientras que el flujo de pico a su vez declinará. Pero lo más sorprendente de todo es que estos pulsos presentarán ahora un retraso anómalo: los componentes de baja frecuencia llegarán antes que los de alta frecuencia.

Estas propiedades sorprendentes de la fuente de emisión atraerán probablemente la atención del observador con independencia de la hipótesis referente a ETI, y le incitarán a aumentar la sensibilidad de su receptor para seguir todos los cambios a lo largo de la sesión: desde el momento del enfoque del impulso a la distancia R_1 hasta el momento de su enfoque a la distancia límite. Es evidente que todas las características físicas de una fuente así serán estudiadas y que se determinará con toda precisión la distancia. Si la civilización receptora es

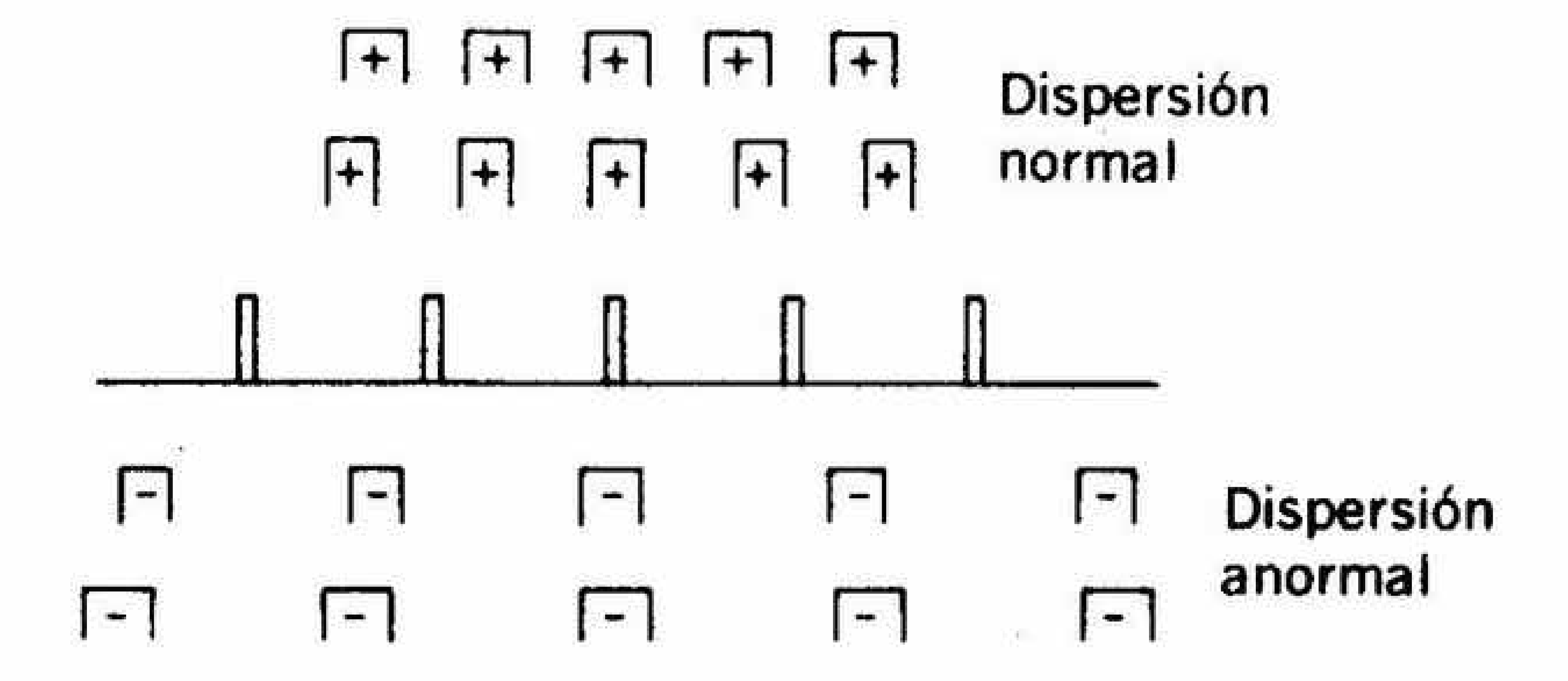


FIG. 25. Separación en el tiempo de las señales transmitidas según el esquema del centro, arriba en el caso de dispersión normal y abajo en el caso de dispersión anormal. Ver detalles en el texto.

de algún modo igual a la nuestra, podemos estar seguros de que los teóricos inventarán muchas teorías para explicar el fenómeno, pero me parece que al mismo tiempo se harán intentos para descifrar la información contenida en esta serie de pulsos.

Pasemos ahora al alcance que puede considerarse óptimo para una transmisión de este tipo. Supongamos que tenemos dadas las siguientes cantidades: primero, la potencia del transmisor P; segundo, el alcance de la búsqueda de distancias (R_1, R_m); tercero, la duración completa de la sesión que incluye tanto la búsqueda de distancias como la búsqueda de dirección en el extremo transmisor; y finalmente la detectividad del sistema de detección. Puesto que en nuestro caso suponemos que no hay busca de frecuencias en el extremo receptor, la detectividad sería simplemente $\tau\, G$, donde τ es la constante de tiempo del receptor, igual en el caso óptimo a la duración del pulso, y G es la ganancia de antena. Definamos el intervalo óptimo como la región del espectro donde la relación señal ruido alcanza su máximo, suponiendo que todas estas cantidades sean iguales en todas las longitudes de onda.

En la figura 26 vemos una curva de la relación señal ruido en función de la frecuencia. Las curvas de la izquierda se deben al ruido de fondo; las de la derecha al ruido cuántico. Las curvas se cortan a la frecuencia de 56 gigaherzios, longitud de onda de 5,35 milímetros. Éste es el intervalo de frecuencias más adecuado para el sistema dado de señales de llamada.

Podemos suponer que el remitente no será excesivamente monótono, y que en cada nueva sesión recurrirá a una nueva serie de pulsos. En este caso, el receptor irá obteniendo continuamente nueva información. Tales señales, que cumplieron con su misión de atraer la atención, empezarán a cumplir su misión de transmitir información.

Finalmente me gustaría darles el siguiente ejemplo para ilustrar las propiedades de información de tal sistema. Supongamos que hemos recibido cinco series consecutivas de pulsos (figura 27). El intervalo de tiempo entre los pulsos recibidos, medido en la duración de un solo pulso, será igual en estas series respectivamente a 7645, 4361, 4553, 4361 y 7625. Si cada uno de esos números se expresa en un código binario y si los escribimos uno debajo del otro y borramos los ceros, obtenemos el nombre de nuestro simposio –CETI– o, como dijo el doctor Sagan, la constelación CETI.

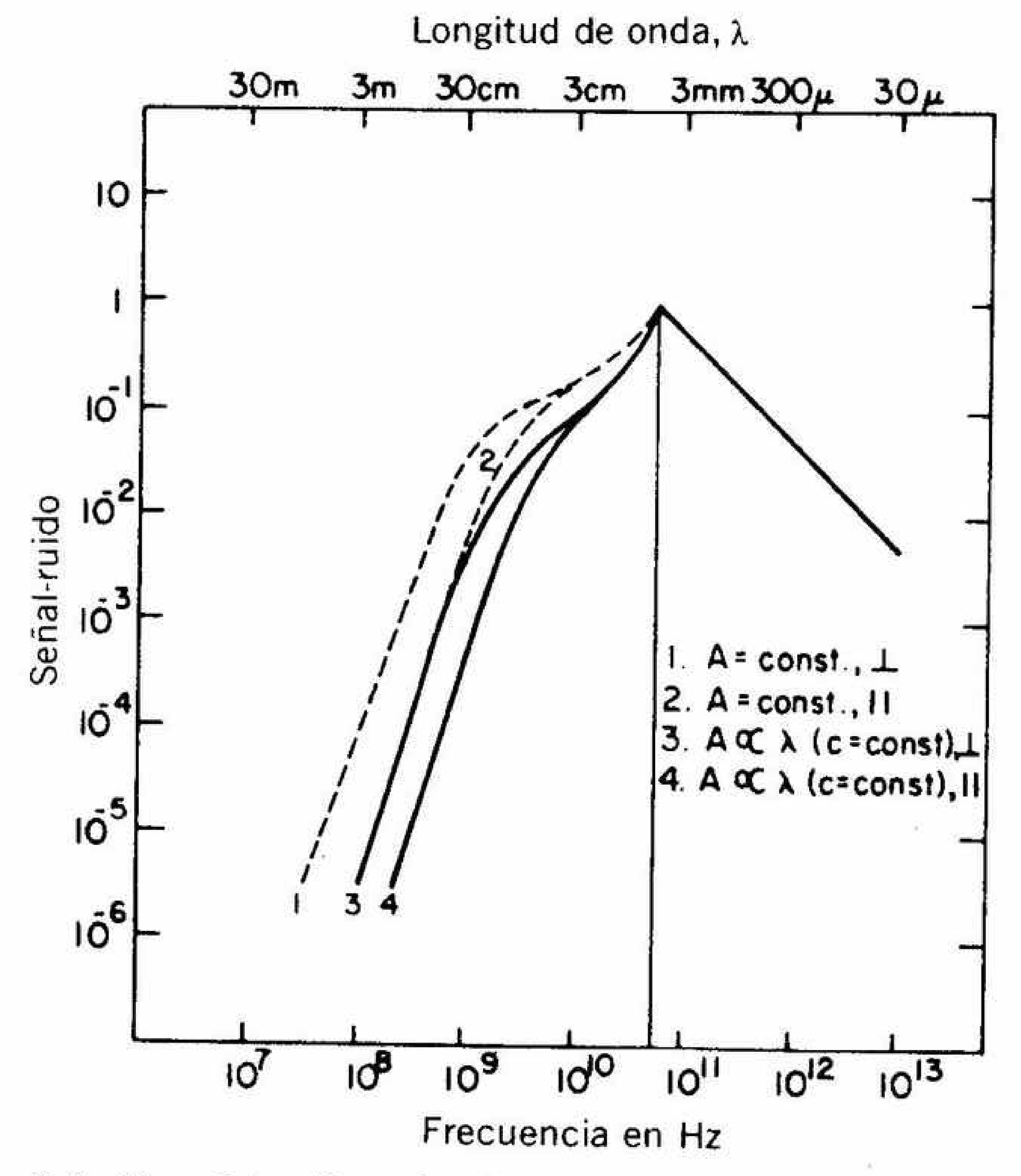


FIG. 26. Relación señal-ruido en función de la frecuencia para dos polarizaciones y dos dependencias de la longitud de onda.

PETROVICH: Me gustaría tocar dos temas: primero, la cuestión de la comunicación entre civilizaciones a base de pulsos lo más corto posible. Mis ideas sobre este tema coinciden con lo que aquí dijo Gindilis, pero mis razones siguen líneas algo diferentes.

Supongamos que una civilización más desarrollada que la nuestra descubre una generación simple de pulsos muy cortos y potentes. Eso puede suceder en varias civilizaciones. Sin embargo, los pulsos cortos una vez que han pasado un medio se han hecho borrosos, se superponen con los pulsos vecinos y no pueden distinguirse. Es evidente que esas civilizaciones saben cómo corregir tales deformaciones. Apuntan sus transmisores hacia nuestro rincón de la Galaxia y pueden introducir correcciones de frecuencia y producir la señal en una condición adecuada para su recepción en el sistema solar. Por lo tanto, me parece lógico además de los receptores monocromáticos

utilizar receptores con bandas mucho más anchas en los intervalos de frecuencia sospechados.

Si organizamos la recepción de tales señales, se planteará de modo seguro la cuestión de la modulación que utilizan. Me parece que según nuestros conocimientos actuales sobre modulación, lo más probable es que utilicen modulación de fase o modulación diferencial de fase.

En este último caso la señal puede asumir una secuencia periódica de pulsos y la información puede representarse por la diferencia en las fases de pulsos adyacentes. El ruido podría disminuirse cerrando el receptor en el intervalo entre pulsos.

El segundo punto está relacionado con lo siguiente: me parece que convendría iniciar ahora la simulación de un proce-

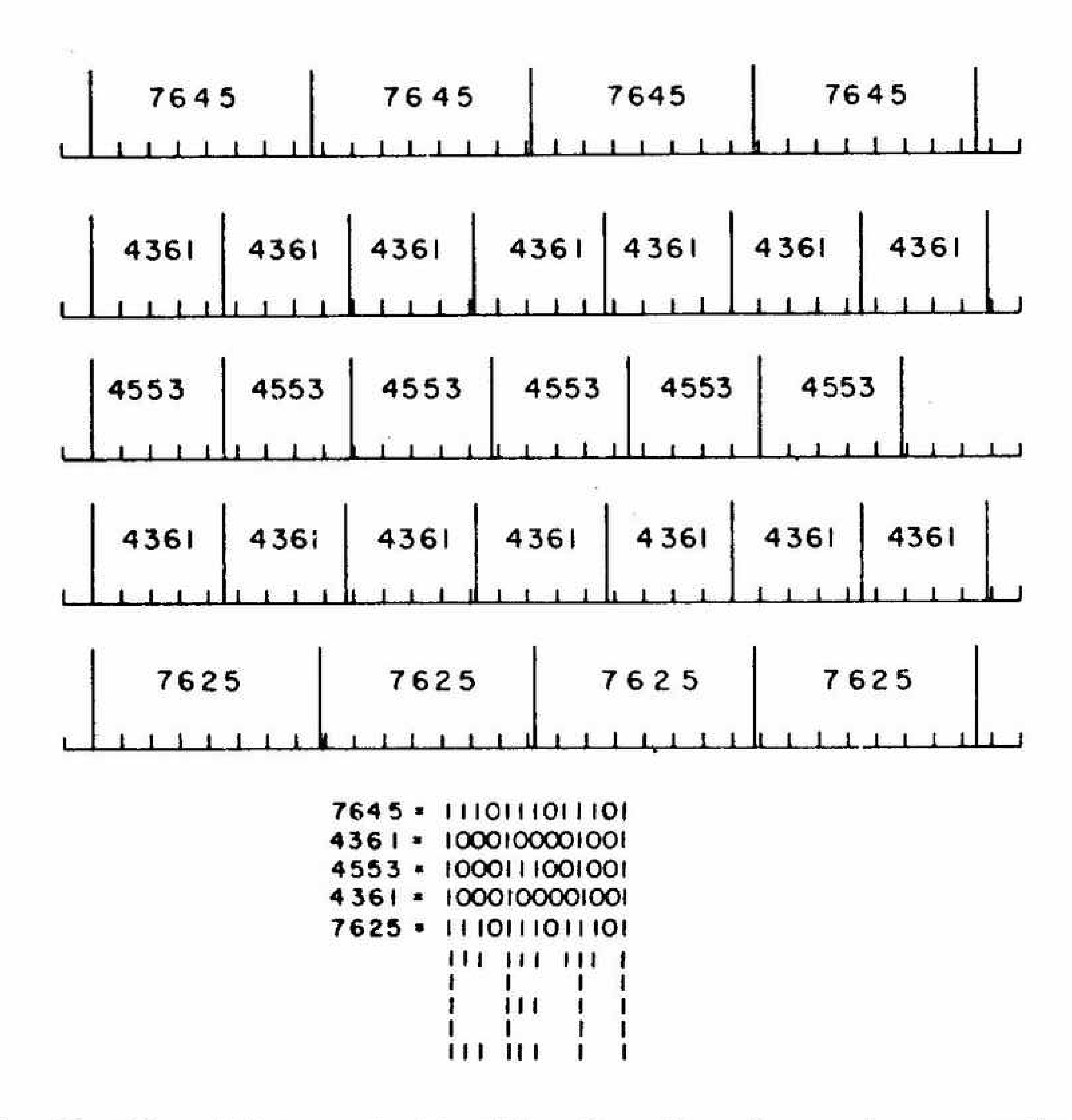


FIG. 27. Mensaje interestelar hipotético. Se reciben cinco series consecutivas de pulsos, y cada serie representa un número repetido de 13 dígitos en aritmética binaria. Si se disponen estos números de 13 dígitos uno debajo de otro y se borran los ceros, sale escrita en inglés la notación CETI: un mensaje sorprendente de parte de una civilización extraterrestre.

so de comunicación entre dos civilizaciones mediante computadoras. Supongamos que tenemos dos máquinas acopladas por un medio interestelar equivalente. Podemos introducir interferencias y estudiar el proceso de establecimiento de la comunicación. La computadora 1 saca una señal simple o una serie de señales. Les hacemos sufrir una distorsión en el medio lo mejor que podemos y la segunda computadora trata de extraer la señal de la interferencia. Luego podemos empezar a enseñar a la computadora algún lenguaje sencillo. Las computadoras pueden estar muy separadas, por ejemplo una en Moscú y la otra en Nueva York, y de este modo podemos empezar a enseñar y a transmitir información sin realimentación. Esta simulación podría ayudarnos a desarrollar la teoría de la comunicación entre civilizaciones y nuevos lenguajes.

Muchos pueden considerar a Lincos como un lenguaje relativamente complicado y controvertido, que difícilmente serviría para enseñar, para instruir a otro participante sin realimentación. Otros creen que Lincos es utilizable. El primer experimento en este país para entrenar estudiantes con Lincos no ha dado resultados negativos. No puedo decir si los experimentos son muy satisfactorios, pero creo que debería ser posible construir un sistema más simple de lenguaje y llevarlo al espacio interestelar.

Mi última observación se refiere a la propuesta de Kardashev sobre los experimentos de las dos islas. Apruebo la idea, pero me parece que dos islas son pocas. Necesitamos por lo menos tres islas para escoger. Si tenemos tres pulsos en lugar de dos, aumentará considerablemente la compatibilidad. Del mismo modo que en las comunicaciones terrestres un sistema con tres canales se hace mucho más resistente a las interferencias.

MORRISON: Tengo una breve pregunta para los doctores Petrovich y Gindilis. ¿Qué grado de insensibilidad presenta el sistema de enfoque en profundidad a la falta de conocimiento sobre las propiedades dispersivas detalladas que varían a lo largo de la línea de vista?

GINDILIS: El emisor produce una señal variable. Uno obtiene una onda que avanza en el espacio y, esté donde esté el observador, más pronto o más temprano estará en el foco. El número de pasos será grande.

PETROVICH: Tengo una respuesta diferente. En mi opinión el enfoque se realiza con respecto a alguna región fija de la

Galaxia y hay un proceso de estado estacionario. La precisión del enfoque no ha de ser muy grande, porque si utilizamos la recepción relativa de un pulso comparado con otro, se reducen en cierta manera las exigencias con respecto a la precisión del enfoque.

PARIISKY: Hay dos maneras de tratar el problema de la observación. Podemos preguntar primero qué clase de instrumento debemos usar para intentar abrirnos paso. Se ha intentado en varias ocasiones responder a esta cuestión, pero me parece que en todo caso las respuestas son especulativas y subjetivas, porque hay que tener en cuenta demasiados factores. Recurriré, por lo tanto, a la segunda manera hablando de los parámetros limitadores de los telescopios de que dispone el hombre actualmente y en el futuro previsible, destinados a fines de observación, y concretamente a su uso en CETI.

Soy un radioastrónomo y por lo tanto empezaré con la parte radioastronómica del espectro. Sin detenerme en su prueba, postularé algo que seguramente contará con la aprobación de todos los radioastrónomos, a saber, que en esta parte del espectro el progreso de técnicas e ideas nuevas en los últimos años justifica la conclusión de que las limitaciones en prácticamente todos los parámetros de este intervalo son financieras. Todo depende de cuándo conseguiremos tal o tal parámetro y esto a su vez depende de cuándo tendremos el dinero.

Sería interesante examinar el ritmo de desarrollo de la radioastronomía en función de las instalaciones. No voy a detenerme en los detalles del proceso y me limitaré principalmente a decir que en los últimos diez años la capacidad de la radioastronomía ha aumentado en dos o tres órdenes de magnitud. Podemos observar que la extrapolación a cinco o diez años vista implica un aumento en nuestro potencial por lo menos de dos o tres órdenes de magnitud en este período.

Es curioso que en el intervalo óptico la magnitud limitadora se mantuviese constante durante mucho tiempo. Sin embargo, también ha habido en los últimos veinte años cierto progreso, y podemos trazar un diagrama similar para el espectro óptico, aunque es bien conocido que presenta ciertas limitaciones. Estoy convencido personalmente de que estas limitaciones se superarán en los próximos diez años. Hay métodos de síntesis de imagen muy conocidos por los radioastrónomos que se desplazan rápidamente hacia la región de ondas más cortas, y su extrapolación nos hace confiar en la aplicación de sistemas

similares en el infrarrojo y eventualmente incluso en el espectro óptico. Me atrevería a recordarles que esta dirección hace posible intervenir en el proceso de formación de la imagen y excluye obstáculos aparentemente tan insuperables como la fluctuación de fase en la troposfera y quizás en el medio interplanetario e interestelar.

Ahora unas palabras sobre proyectos concretos en este campo. Es bien sabido que los discos paraboloidales, como se deduce de modo sorprendente de la discusión de Von Hoerner sobre la Tierra y como demostró Kardashev para el espacio exterior, pueden ser muy grandes; pero tienen ciertas limitaciones. Una versión internacional de un tal radiotelescopio con una superficie de 10^6 metros cuadrados (que en nuestra opinión no implicaría ningún problema técnico insuperable) fue propuesta por el Observatorio Pulkuovo en Hamburgo en 1964: y ahora, aquí en la Unión Soviética, aunque no construimos un telescopio tan grande, estamos construyendo nuestro primer radiotelescopio que programa desde el principio el problema CETI (aunque si bien como último punto y no el primero). Se trata de un radiotelescopio del tipo de anillo de 600 metros de diámetro destinado a trabajar en el espectro de onda corta hasta los 8 milímetros con una superficie geométrica de hasta 10 000 metros cuadrados.

Sin embargo, incluso ahora lo que he dicho demuestra que en los próximos cinco a diez años podemos esperar instalaciones más potentes; y me parece que lo más prometedor por ahora, por lo menos en la fase actual, es el desarrollo de sistemas multielementales consistentes en un número elevado de elementos suficientemente grandes, y con una apertura, en una estimación aproximada, igual al diámetro de la Tierra. (Ver *Izvestia Glavnoy Astron. Obs.*, URSS, 188, 1972.)

Pero vemos que debemos de nuevo empezar a pensar en sistemas mayores. Resulta difícil decir qué clase de sistemas serán. No hablaré aquí de aplicaciones tan fantásticas como la posibilidad de utilizar Venus o Júpiter donde el índice de refracción es superior y la absorción troposférica probablemente no es muy grande, lo cual permitiría considerar estos planetas como lentes gigantescas para observar el universo, permitiéndonos obtener superficies de captación enormes: para Júpiter del orden de 10^9 metros cuadrados.

Me gustaría indicar aquí que el uso de telescopios holográficos de este tipo o del tipo de síntesis de apertura con puntos de referencia permitirá realizar nuevos progresos en el espectro óptico, así como en las magnitudes estelares límites. Desde

el punto de vista de los radioastrónomos, los telescopios ópticos son instrumentos muy pobres con una eficiencia baja; las reservas disponibles son del orden de la razón de los límites de turbulencia a los límites de difracción elevada al cuadrado –hasta un cierto límite, evidentemente.

Al diseñar sistemas CETI, es necesario dejar un margen para el fuerte ritmo del avance tecnológico. Es evidente, a juzgar por este ritmo, que en los próximos diez años los sistemas planetarios extrasolares cercanos quedarán disponibles para un estudio considerablemente detallado, como sucedió con el sistema solar al iniciarse la astronomía planetaria. Me parece que hay que destacar esta tendencia no sólo para la astrofísica sino también para la confianza en muchas de nuestras estimaciones sobre CETI.

Y ahora dos notas breves: el profesor Troitsky me sugirió que para tener en cuenta el efecto dispersivo del medio, el enfoque de la señal a alguna distancia debería efectuarse por adelantado. Además parece probable que la escala de los radiotelescopios aumentará marcadamente, y que quizá sea posible enfocar la señal a una distancia muy grande. Aunque la distancia focal de un sistema así equivaldrá a un número enorme de longitudes de onda, al mismo tiempo serán muchos órdenes de magnitud menor que la distancia a la fuente.

DRAKE: Me parece que con un telescopio para una longitud de onda de 10 cm, cuyo diámetro sea igual al diámetro de la Tierra, el campo próximo se extiende muy lejos, pero aunque sólo se extienda a un décimo de parsec, creo que esto implicaría la imposibilidad de enfocar la radiación a no ser que uno disponga de una apertura superior al diámetro de la Tierra.

PARIISKY: Yo pienso en sistemas todavía mayores. Estoy convencido de que la extrapolación demuestra que no es algo fantástico. El tamaño de estos sistemas será del orden de una unidad astronómica. La zona próxima de un telescopio de tamaño global se puede utilizar para la astronomía galáctica tridimensional. Una línea base del orden de una unidad astronómica nos daría acceso a la entera metagalaxia.

SAGAN: Es muy interesante oír al doctor Pariisky informarnos de que los problemas CETI se incorporarán desde el principio al telescopio en construcción de 600 metros. Pero me pregunto en qué circunstancias los doctores Troitsky y Pariisky estarían dispuestos a continuar durante períodos de tiempo

muy largos estas actividades, si faltaran señales evidentes de haber entrado en contacto con ETI: se trata de una cuestión de administración del telescopio.

MOROZ: Voy a hablar del problema de escoger longitudes de onda óptimas en el caso de una comunicación mutua entre dos estrellas relativamente próximas.

Las fórmulas (35 y 36) fueron presentadas ya esencialmente por el doctor Drake:

$$R^2 = PGA_2/4\pi P_n(\lambda),$$

y

$$G = 4\pi A_1/\lambda^2.$$

La ganancia es inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda. Esto es importante. En otras palabras, si utilizamos antenas en el límite de difracción, la distancia aumenta al disminuir la longitud de onda. Creo que ésta es una de las limitaciones fundamentales que debemos tener en cuenta al escoger la longitud de onda óptima.

La segunda limitación es la dependencia del ruido en relación a la longitud de onda, o más bien del ruido determinado por las fluctuaciones del fondo. Hablando en general, si nos desplazamos hacia longitudes de onda más cortas, al llegar a una longitud de onda suficientemente corta tendremos que tener en cuenta el mismo fondo de la estrella. ¿Cuál será entonces el aspecto de las fluctuaciones en la emisión de fondo? Se tratará, como es lógico, de una aproximación muy basta.

Supongamos que la amplitud de banda de la frecuencia es proporcional a la frecuencia. La potencia de las fluctuaciones de la emisión estelar aumenta hacia las longitudes de onda cortas según λ^{-2} (para longitudes de onda $\lambda >> 1\ \mu$); la potencia de las fluctuaciones del fondo general aumenta según $\lambda^{-1/2}$ para la región de Rayleigh-Jeans del espectro y disminuye para la región de Wien. La figura 28 nos demuestra cualitativamente la dependencia con relación a λ de estas dos fluctuaciones rápidas de los componentes.

Pasemos ahora a la relación señal-ruido. También aquí tenemos un factor λ^2 en el denominador. La figura 29 muestra los resultados con S/N en función de la longitud de onda. Obtenemos una constante cuando el fondo estable prevalece

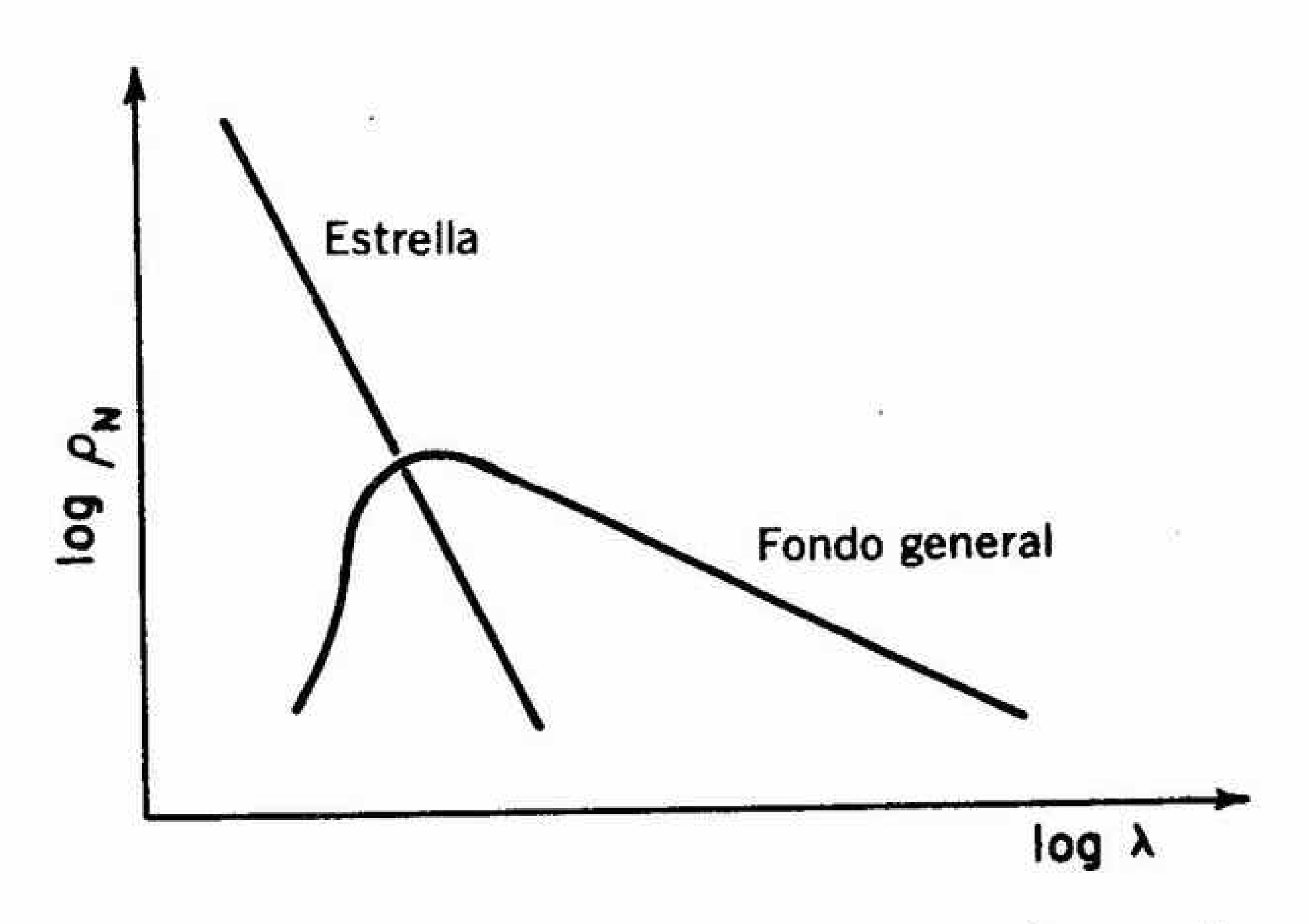


FIG. 28. Representaciones esquemáticas de las fluctuaciones en la potencia emitida por las estrellas y por el fondo general galáctico.

mientras estamos en la proximidad de la estrella; y cuando prevalece el fondo amplio obtenemos un descenso en la relación S/N. Parece obvio que lo mejor es escoger una longitud de onda situada en algún punto de la primera caída de la curva, cerca de los 10^{-2} cm, porque no ganaremos nada desplazándonos más a la izquierda y el diseño del telescopio se hace más difícil.

He estimado la fórmula correspondiente y he visto que depende de parámetros concretos: la distancia a la estrella, el tamaño de la antena y la razón del diámetro a la distancia en parsecs. En todos los casos obtenemos entonces una longitud de onda óptima de unos 10^{-2} cm. Eso quizá desagrade a los radioastrónomos, pero me parece justificado. El resultado nos conduce a la parte infrarroja del espectro.

Recuerdan evidentemente lo que Drake nos mostró (figura 18): una temperatura de ruido constante en el intervalo centimétrico y un aumento tanto hacia las longitudes de onda más largas como hacia las más cortas. Quiero decir que el concepto de temperatura equivalente que utilizamos está equivocado. No permite comparar la relación señal ruido en las regiones de ondas cortas y largas. En las regiones de ondas cortas las fluctuaciones están determinadas por

$$P_n = kT(\Delta\nu/\tau)^{1/2}. \quad (37)$$

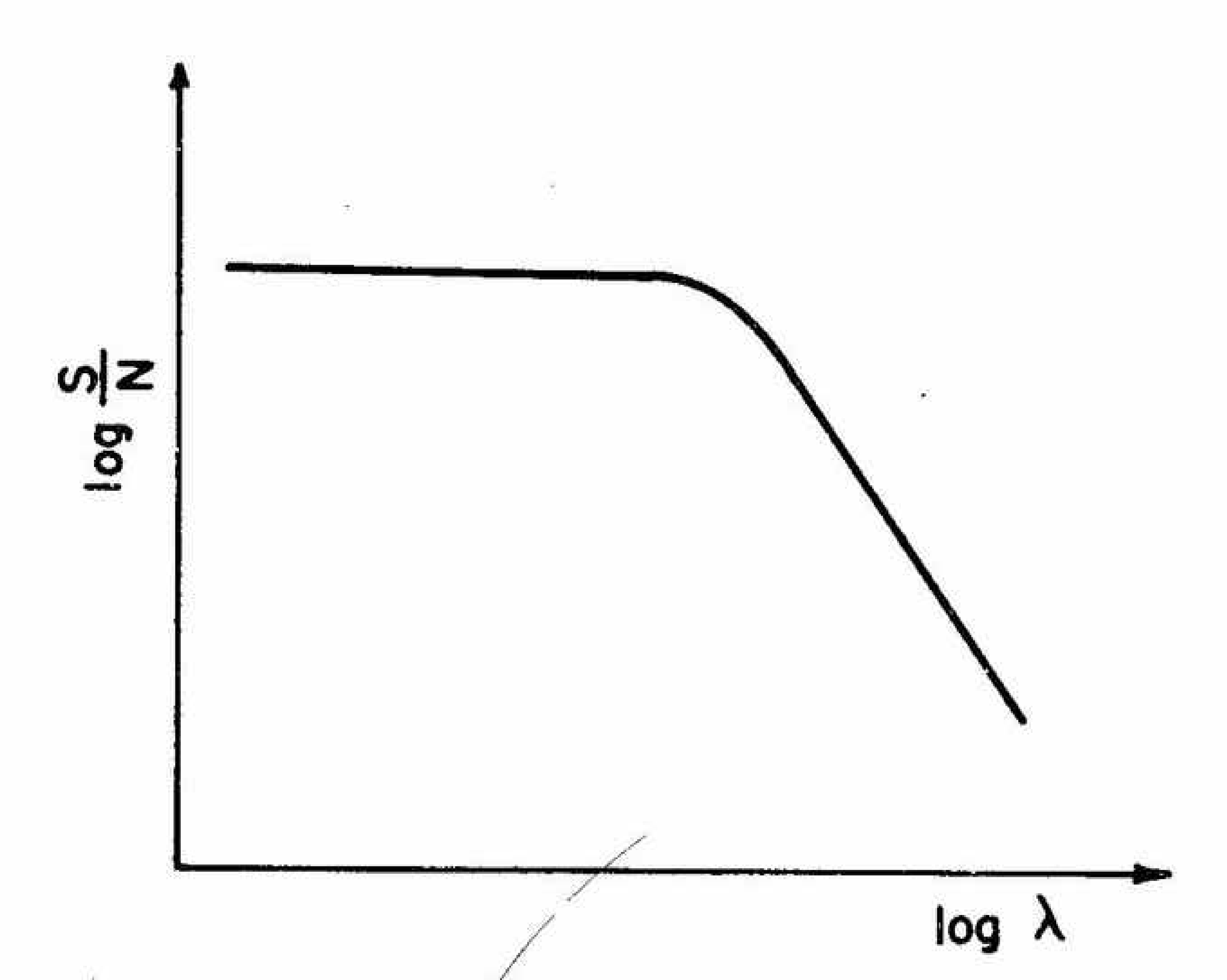


FIG. 29. Dependencia de la relación señal-ruido en relación a la longitud de onda para los mismos dos factores de la figura 28.

Cuando lo que prevalece son las fluctuaciones cuánticas, la energía mínima ya no es kT sino $h\nu$, y entonces podemos substituir $h\nu$ por kT. Esto justifica la introducción de la temperatura equivalente $Te = h\nu/k$.

Pero si escribimos la fórmula para la fluctuación de señal, será del todo diferente. Tendrá este aspecto:

$$P_n = (I_\nu \Delta\nu A_2/\tau h\nu)^{1/2}, \quad (38)$$

donde I_ν es la potencia total de la señal y A_2 es la superficie de la antena receptora. Como ven, estas fórmulas son muy diferentes y no tiene sentido introducir esta temperatura para describir el ruido en el espectro visible y de radio. Podemos demostrar con ejemplos sencillos que este procedimiento conduce a grandes errores.

OLIVER: Aquí hay una confusión. Se puede considerar el ruido cuántico o bien como un incremento de temperatura al hablar de receptores coherentes o en función de la energía por cuanto exigida por la señal cuando se habla de receptores incoherentes. En ambos casos, la región de alta frecuencia es más costosa en un sentido que aparece reflejado en las observaciones del doctor Drake (pp. 227-234).

MOROZ: El hecho es que si consideramos el caso concreto de estrellas próximas obtenemos una fluctuación del fondo

estelar mucho mayor que la fluctuación de la señal. Para ver la señal del fondo tenemos que hacerla tan grande que las fluctuaciones de la señal serían menores que las fluctuaciones de la estrella. Estoy de acuerdo con usted en que hay fluctuaciones de la señal y se han de tener en cuenta, pero aquí, en este problema restringido, esto tiene poca importancia.

OLIVER: Me propongo resumir algunos de los recientes avances en nuestras ideas sobre la posible manera de emprender la búsqueda de señales que podrían representar radiaciones electromagnéticas de civilizaciones inteligentes en otras partes de la Galaxia. La mayor parte de lo que voy a decir es el resultado de un programa estival de estudio llevado a cabo el año pasado en el Centro de Investigación Ames bajo los auspicios conjuntos de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (representada por Ames) y de la Sociedad Americana para la Educación en Ingeniería (representada por la Universidad de Stanford), programa conocido como Proyecto Cyclops. Por lo que sé, Cyclops constituyó el estudio más completo del tema en los últimos años, por lo menos en los Estados Unidos. Eso no quiere decir que no se hayan llevado a cabo esfuerzos meritorios en otras partes ni que éstos no hayan producido avances significativos. Mi problema es simplemente que estuve demasiado inmerso en el estudio Cyclops para enterarme de otros trabajos. Por lo tanto, les pido que perdonen como una ignorancia sincera cualquier omisión de avances importantes por parte de otros investigadores. Quizá la discusión revele desarrollos que debía haber conocido, pero no conozco.

La NASA puede proporcionar copias del informe Cyclops. El número del documento es CR 114445. Quienes estén seriamente interesados en el tema quedan invitados a estudiar el informe, que, como es lógico, cubre más aspectos del problema y de modo más completo de lo que yo pueda hacer aquí.

La ventana de las microondas

El estudio serio sobre la posibilidad de comunicación interestelar empezó con el artículo de Cocconi y Morrison de 1959 en *Nature*, que sugería utilizar la línea del hidrógeno a 1 420 megaherzios como frecuencia natural para la búsqueda de señales. Esto desembocó en un intento muy breve en 1960 por parte de Frank Drake en el Observatorio Nacional de Radioastronomía para escuchar señales de dos estrellas, Epsilon Eri-

dani y Tau Ceti, con la antena de 85 pies y un receptor con una temperatura de ruido de 350° K y una amplitud de banda de 100 herzios. El proyecto Ozma, como se denominó este intento, no obtuvo señales.

Aproximadamente en la misma época se inventó el laser, y muchas personas, empezando por Schwarz y Townes, han propuesto el uso de lasers para la comunicación interestelar. Los lasers han sido objeto de una gran cantidad de investigaciones durante los últimos diez años, y sus capacidades y limitaciones últimas se comprenden mucho mejor ahora que hace diez años. El estudio Cyclops hizo una comparación cuidadosa entre lasers y microondas para la producción de señales interestelares y el veredicto se inclina fuertemente a favor de las microondas.

Conviene comprender que las microondas son superiores por razones *fundamentales*, y no sólo porque representan un arte más maduro. Las razones se refieren primariamente a la energía. Cualquier señal que utilicemos ha de superar los ruidos naturales de fondo que proceden:

a) del ruido galáctico (radiación de sincrotrón);

b) del ruido térmico (ruido del receptor y ruido isotrópico de fondo);

c) del ruido cuántico (emisión espontánea o ruido de disparo); y

d) del ruido estelar.

La figura 30 presenta las contribuciones de los tres primeros elementos en la región de las microondas. Por encima del gigaherzio el ruido galáctico queda por debajo de la radiación isotrópica de fondo. Por encima de unos 60 gigaherzios el ruido cuántico excede este ruido de fondo y aumenta indefinidamente con la frecuencia. Por lo tanto, en el espacio exterior el cielo está en su punto más callado de 1 a 60 gigaherzios. Ésta es la ventana de microondas del espacio libre. En la tierra y en planetas de tipo terrestre las líneas de absorción del vapor de agua y del oxígeno echan a perder la ventana por encima de los 10 gigaherzios, pero, como veremos, la parte inferior de la ventana es preferible por otros motivos, y por lo tanto el hecho carece de importancia.

El alcance límite de un enlace de comunicación interestelar puede escribirse de la siguiente manera:

$$R = \frac{d}{4}\left(\frac{P_t g_t}{\psi B}\right)^{1/2} = \frac{d}{4}\left(\frac{P_{eff}}{\psi B}\right)^{1/2}, \qquad (39)$$

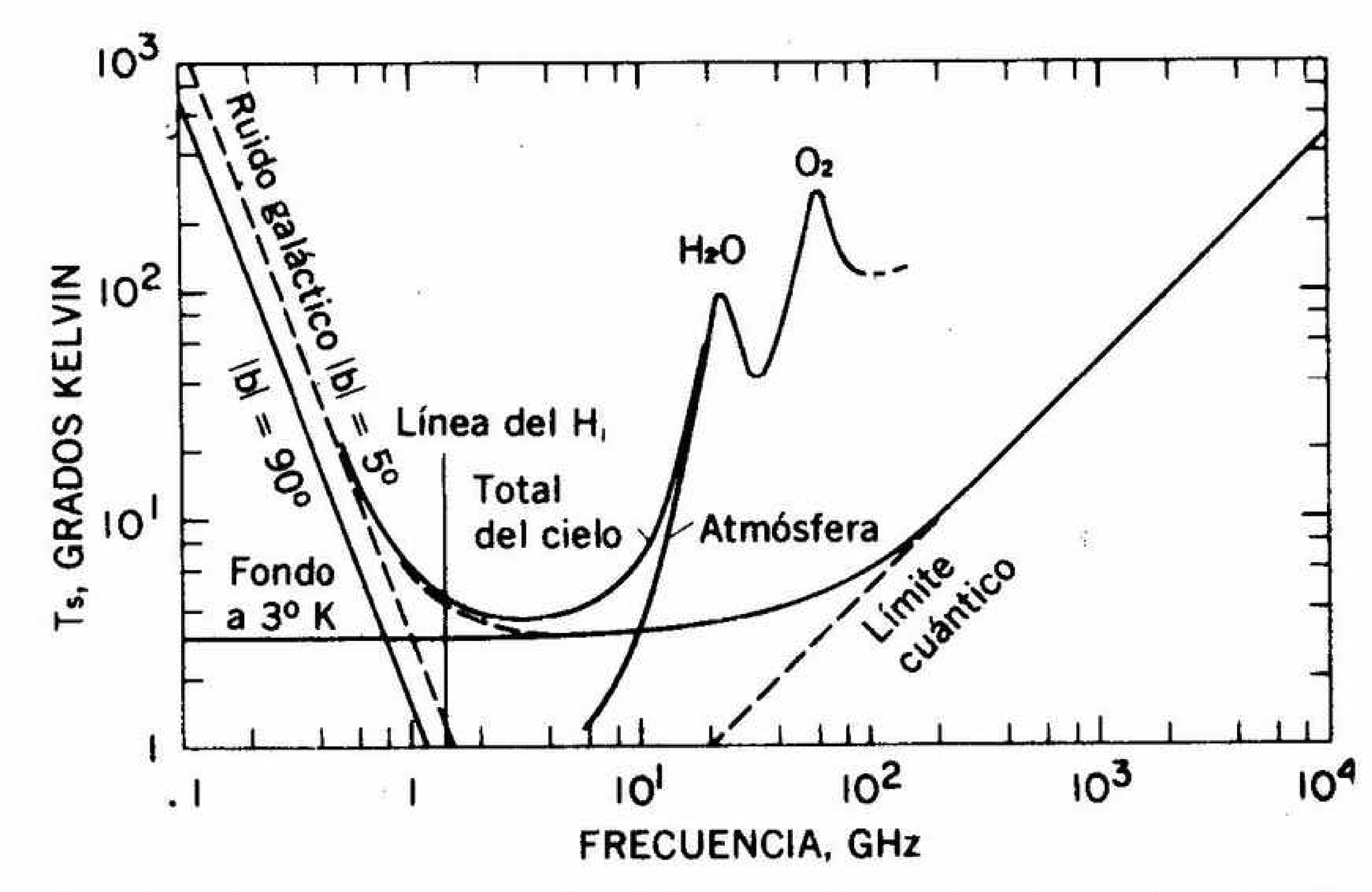


FIG. 30. La temperatura de ruido del sistema T_s en radioastronomía en función de la frecuencia, y teniendo en cuenta a la derecha el ruido cuántico. La radiación del cuerpo negro a 3° K aparece en la parte inferior. Las fuentes de ruido galáctico en dos latitudes galácticas distintas están a la izquierda.

donde R es el alcance, d el diámetro de la antena receptora, P_t la potencia transmitida, g_t la ganancia de la antena transmisora $P_{ef} = P_t g_t$ la potencia efectiva radiada, ψ la densidad espectral de la potencia de ruido y B la amplitud de banda del receptor. ¿Qué podemos hacer para maximizar el alcance R? Es evidente que si estamos a la escucha no tenemos control sobre la potencia transmitida ni sobre la ganancia de la antena transmisora. (Los radiofaros probablemente radiarán de modo omnidireccional, con lo que $g_t = 1$). Vemos que el alcance es directamente proporcional al diámetro de la antena; por lo tanto, necesitaremos las mayores antenas que podamos construir. Pero la directividad de la antena es proporcional al diámetro medido en longitudes de onda. Si hacemos la directividad demasiado grande, no podremos mantener el haz receptor apuntado al objetivo. Esto significa que deberíamos usar la longitud de onda *más larga* o la frecuencia *mas baja* que podamos para disponer del mayor diámetro de antena utilizable.

Vemos que el alcance es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la potencia del ruido por herzio (ψ); por consiguiente, escogeremos la parte más quieta del espectro. Vemos también que el alcance es inversamente proporcional a

la raíz cuadrada de la amplitud de banda B del receptor. La amplitud de banda más estrecha que podemos usar está determinada por el desplazamiento en frecuencia de la señal. Las relaciones importantes son en este caso

$$\tau = \frac{B}{\dot{\nu}} = \frac{\text{anchura de banda}}{\text{velocidad de desplazamiento de la frecuencia}}, \quad (40)$$

$$\frac{1}{B} \approx \tau = \text{tiempo de respuesta}, \quad (41)$$

$$\therefore B \gtrsim (\dot{\nu})^{1/2} = (\alpha\nu)^{1/2}, \quad (42)$$

$$\alpha \equiv \frac{\dot{\nu}}{\nu} = \text{estabilidad de frecuencia.} \quad (43)$$

La ecuación (40) dice simplemente que el tiempo de permanencia dentro de la banda del receptor de una señal que se desplaza es proporcional a la amplitud de banda B e inversamente proporcional a la velocidad de desplazamiento $\dot{\nu}$. La ecuación (41) dice que el tiempo de respuesta es aproximadamente igual al recíproco de la amplitud de banda. Si queremos que el receptor responda plenamente a la señal que se desplaza, su amplitud de banda debe ser igual o mayor que la raíz cuadrada de la velocidad de desplazamiento. Puesto que la velocidad de desplazamiento de la frecuencia es proporcional a la misma frecuencia, la amplitud de banda mínima que podemos usar es proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia (ecuación 42). Así pues, el ruido total recibido con un receptor ideal es proporcional a la temperatura del cielo por $\nu^{1/2}$, como se ve en la figura 31.

El desplazamiento en frecuencia puede deberse a inestabilidades del oscilador o al desplazamiento doppler diurno. Sea cual fuere su origen, será siempre proporcional a la frecuencia de trabajo, por lo tanto, el nuevo mínimo que aparece en la figura 31 es independiente de la tecnología. Vemos ahora que la parte óptima del espectro está situada entre 1 y 2 gigaherzios.

Resumiendo, hemos gravitado hacia el extremo inferior de la ventana de microondas porque:

1. El producto del ruido del cielo y de la amplitud de banda utilizable es mínima allí.

2. Pueden conseguirse antenas receptoras, para una amplitud mínima dada del haz, mayores que a frecuencias superiores; y

3. La superficie colectora es más barata cuanto más baja es la frecuencia.

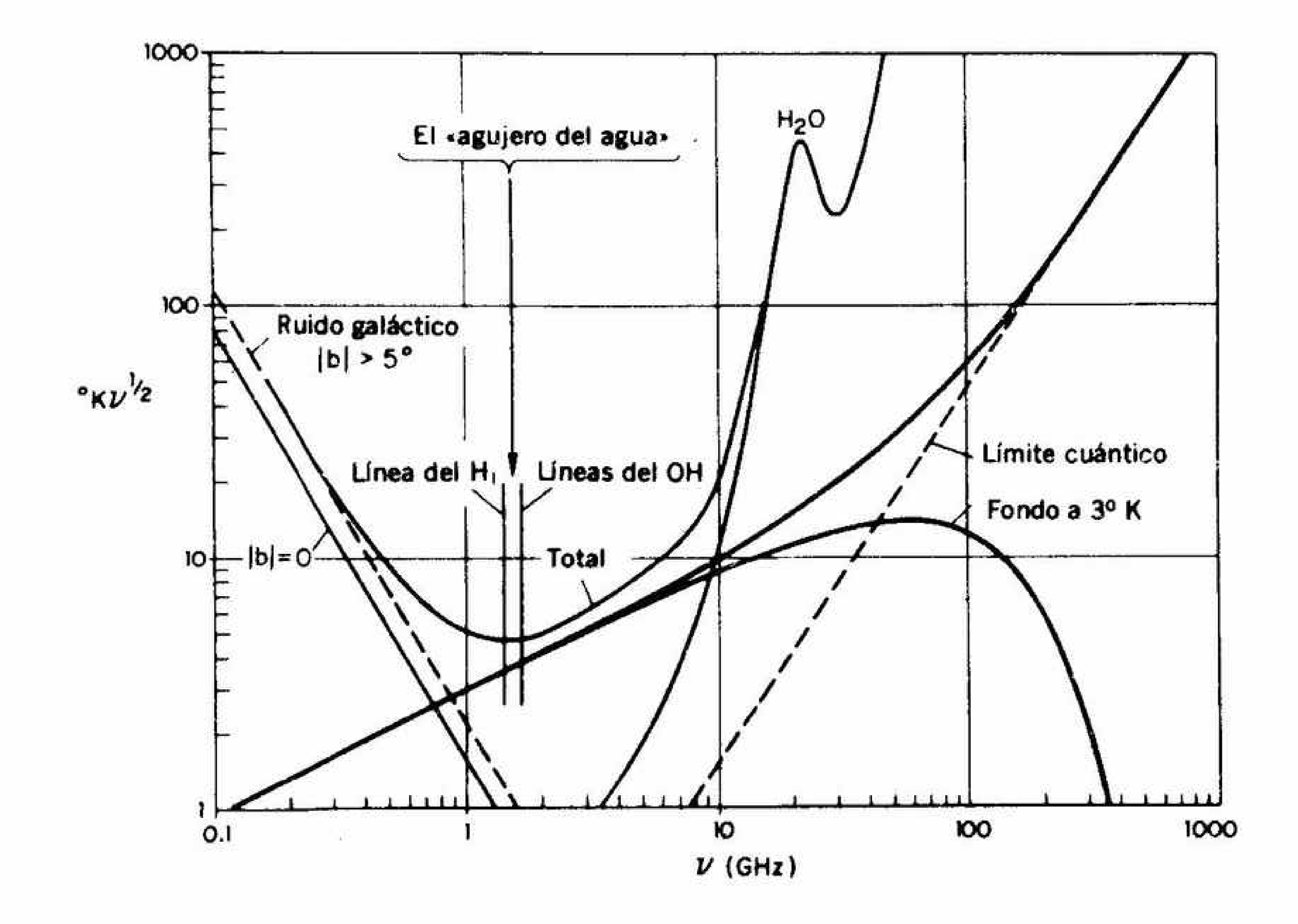


FIG. 31. Gráfico del ruido total recibido por un receptor ideal en función de la frecuencia. El ruido mínimo está entre 1 y 2 GHz, donde residen las líneas del hidrógeno (21 cm) y del hidroxilo (18 cm). Esta región, llamada el «agujero del agua», puede ser el canal preferente de radiocomunicaciones interestelares.

El agujero del agua

Se plantea la siguiente cuestión: ¿existe una banda de frecuencias relativamente estrecha en esta parte óptima del espectro donde la comunicación interestelar sea especialmente probable? Vemos que la línea del hidrógeno está precisamente en la mejor parte del espectro; por lo tanto, la sugerencia original de Cocconi y Morrison era lógica. Sin embargo, la línea del hidrógeno es en sí misma ruidosa. Además, si deseamos transmitir y recibir al mismo tiempo sin interferirnos y si hay varios enlaces interestelares que quisiéramos operar en última instancia simultáneamente, nos gustaría disponer no de una sola frecuencia sino de una *banda* de comunicación y búsqueda interestelar definida de modo natural.

No podemos estrechar la banda más del mínimo mostrado, por motivos *técnicos;* por lo tanto, tenemos que buscar otras razones, incluso razones poéticas. Y de hecho descubrimos

que en estas cuestiones la naturaleza se ha mostrado bastante romántica. La línea del hidrógeno está en los 1 420 megaherzios. A sólo 242 megaherzios por encima está la primera línea del hidroxilo en la frecuencia de 1 662 megaherzios. Entre estas dos líneas, en la parte más tranquila del espectro hay otras líneas espectrales conocidas. El equipo Cyclops cree que esta banda, situada entre las resonancias de los dos productos de disociación del agua, es la banda predeterminada de comunicación interestelar. ¿Qué lugar más poético podría darse para que una vida basada en el agua buscara a sus semejantes sino el ancestral punto de reunión de todas las especies: *el agujero del agua?*

El informe Cyclops recomienda que se adopten inmediatamente resoluciones a nivel internacional para proteger esta banda y reservarla a los fines CETI. La línea del hidrógeno ya está protegida. Lo único que falta es extender la protección en una frecuencia de 200 megaherzios más arriba, hasta la línea del hidroxilo.

Tamaño necesario de la antena receptora

Los mejores receptores que podemos construir hoy en día añaden una cantidad apreciable de ruido al que recibimos del cielo. En lugar de una temperatura de ruido de unos 40° K tendremos una temperatura total de ruido en el sistema de unos 200° K. Esto significa que tendremos que recoger unas cinco veces más señal que la necesaria con un receptor *ideal.* ¿Qué tamaño de antena necesitaremos?

Sólo podemos dar una respuesta muy aproximada a esta cuestión porque

a) no sabemos a qué distancia en el espacio tendremos que buscar para dar con una señal, y

b) no sabemos la potencia que tendrá la señal esperada. Nuestras estimaciones sobre la densidad de la vida comunicativa en la Galaxia son muy inciertas, fundamentalmente porque no sabemos cuánto tiempo persisten las razas avanzadas cuando intentan comunicarse entre sí. Si suponemos de un modo pesimista que ya no existe comunicación y que las demás razas como nosotros sólo llevan a cabo intentos ocasionales para escuchar y emitir, quizá tengamos que buscar todas las estrellas probables hasta más de 1 000 años-luz. Si nos mostramos optimistas y creemos que la comunicación interestelar es una realidad existente, las razas comunicativas pueden radiar

desde radiofaros para atraer nuevas razas a la comunidad galáctica y pueden hacerlo durante millones de años. En ese caso podemos detectar otra vida a una distancia inferior a los 100 años-luz. O podemos detectar filtraciones en las señales dentro de este alcance.

En cuanto a la potencia radiada por los radiofaros podríamos suponer que las razas equilibran en general el coste de la transmisión con el coste de la recepción. En este caso pueden ser razonables potencias del orden de los 10^9 vatios. La figura 32 muestra el alcance de un sistema receptor en función del diámetro de la antena. Se supone que la temperatura de ruido del sistema es de 20° K y se supone que las amplitudes de onda se corresponden con las velocidades de desplazamiento de frecuencia indicadas.

Los desplazamientos doppler no compensados se suponen que tendrán una velocidad de 1 herzio por segundo (en el agujero del agua) y las velocidades compensadas pueden bajar hasta 10^{-2} herzios por segundo. Vemos que para poder detectar un radiofaro de 1 000 megavatios a 1 000 años-luz de distancia necesitaremos diámetros de antena de varios kilómetros. Antenas únicas de este tamaño no pueden construirse en la Tierra y su construcción y funcionamiento en el espacio resultan de un coste prohibitivo.

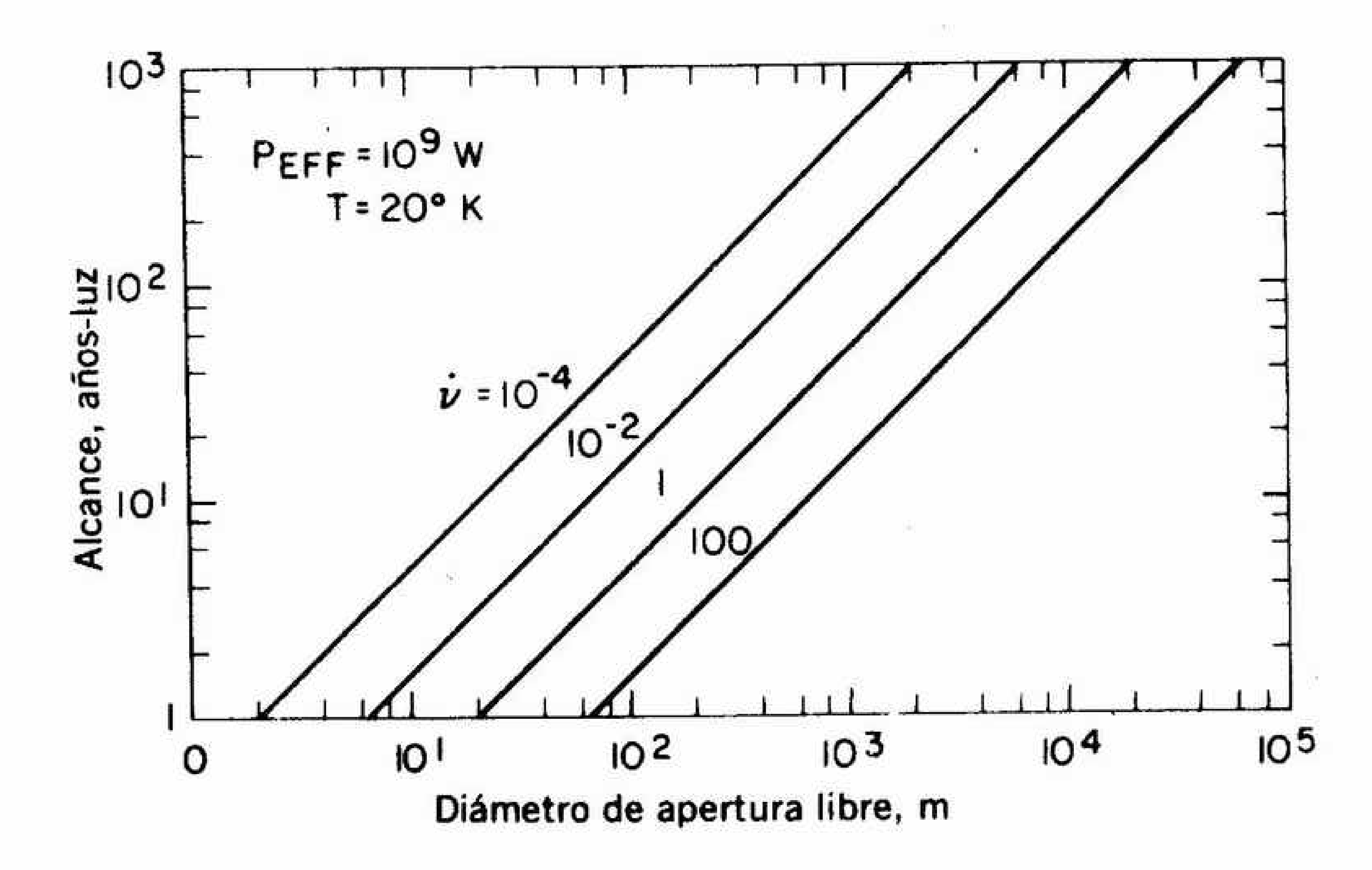


FIG. 32. El alcance en función del diámetro de apertura para diversas velocidades de desplazamiento de la frecuencia y otros parámetros indicados.

Nos vemos pues obligados a considerar sistemas en fase de antenas menores, quizás de 1 000 a 10 000 platos de 100 metros de diámetro. Un sistema de antenas presenta ventajas claras en comparación con una antena sola. En primer lugar, la posición precisa del haz se efectúa eléctrica y no mecánicamente. Una precisión en el apuntado de menos de un segundo de arco es difícil de conseguir mecánicamente, pero es fácil eléctricamente. En segundo lugar, el sistema puede aumentarse gradualmente de tamaño con el tiempo. No tiene que construirse nunca con un tamaño mayor del necesario para la tarea. No hay peligro de pasarse en el diseño. Vista la incertidumbre sobre el tamaño requerido, esta ventaja es importante.

Limitaciones en el tamaño del sistema

En un sistema en fase las señales recibidas por cada antena individual del sistema –por cada *elemento* de él– se heterodinan y rebajan a una frecuencia intermedia común y se transmiten al puesto central donde se suman las señales. Para que funcione satisfactoriamente:

1. Los osciladores locales de cada receptor han de mantener la relación de fase correcta entre sí en un intervalo de unos pocos grados eléctricos.
2. Las señales de frecuencia intermedias se han de transmitir todas a la central a través de circuitos con una ganancia y un retardo constantes.
3. Hay que introducir retardos variables en todos los caminos para poder maniobrar el haz. Estos retardos han de tener una precisión del orden del nanosegundo.
4. Todos los receptores han de poderse sintonizar a distancia en la misma banda y han de funcionar sin cuidados durante períodos largos.
5. El sistema ha de poder comprobarse y calibrarse por sí mismo bajo el control de una computadora.
6. Toda la secuencia de búsqueda ha de estar automatizada.

Una parte importante del esfuerzo del estudio Cyclops se consagró a la solución de estos problemas. Como consecuencia del estudio puedo informar ahora con confianza que son posibles en la práctica sistemas de hasta 10 kilómetros de diámetro con frecuencias de hasta 10 gigaherzios y sistemas de hasta 30 kilómetros con frecuencias de hasta 3 gigaherzios. Puesto que los elementos de la antena han de estar separados a una distancia de unas tres veces su diámetro, esto corresponde a aperturas claras de 3 y de 10 kilómetros de diámetro en los 10 y los 3 gigaherzios respectivamente. Creemos también que son factibles receptores sintonizables a distancia con temperaturas de ruido que bajan hasta los 20° K de 1 a 2 megaherzios y hasta los 30° K a los 10 gigaherzios. El diseño del receptor Cyclops permite una banda instantánea de 100 megaherzios. Estudios posteriores permitirían probablemente aumentar este valor a 200 megaherzios.

No dispongo de tiempo para entrar en detalles sobre la resolución de estas dificultades. Los interesados quedan invitados a leer el informe Cyclops. Por el momento tengo que limitarme a afirmar que en mi opinión este tipo de sistema receptor es ya posible. Los avances futuros de la tecnología pueden hacer la tarea más fácil, pero actualmente puede llevarse a cabo.

Podemos, pues, visualizar el sistema de búsqueda como un conjunto de 1 000 o más grandes radiotelescopios maniobrables, conectados todos entre sí para constituir una gran antena; un huerto de antenas que cubriría 20 kilómetros cuadrados o más, cada una de las cuales alimentaría a un único sistema de proceso de datos y obedecería a un control automático por computadora. El sistema podría empezar la búsqueda por las estrellas cercanas con sólo unas cuantas antenas en marcha y luego podría profundizar en su búsqueda dentro del espacio a medida que se fueran añadiendo más antenas al sistema. El tiempo total de construcción podría ser de 10 a 20 años.

La estrategia de la búsqueda

La directividad muy elevada del sistema –en realidad de cada elemento del sistema– excluye la posibilidad de buscar ciegamente en el espacio por todo el cielo o de investigar varias estrellas al mismo tiempo. Deberemos, por el contrario, compilar una lista de probables estrellas candidatas e investigarlas una por una.

Se cree que las estrellas probables son las F últimas, todas las G, y las primeras K en la serie principal de estrellas. Dentro de una distancia de 1 000 años-luz del Sol hay aproximadamente un millón de estrellas de este tipo. No existe catálogo de estas estrellas. Por lo tanto antes de poder iniciar una búsqueda en el espacio realmente a fondo hay que identificar y localizar estas estrellas con un programa de búsqueda óptica. El informe Cyclops presenta algunas sugerencias sobre la manera de llevarlo a cabo.

Existen listas para unos cuantos centenares de estrellas más próximas. Podrían investigarse estas últimas mientras se confecciona la lista completa. Podemos permitirnos dedicar varias horas o días a cada una de las más o menos 1 000 estrellas probables más próximas, es decir, a todas las estrellas probables situadas hasta 100 años-luz. Eso significa que podremos buscar no sólo radiofaros sino también señales infiltradas: las señales que radian para sus propios fines.

Pero si tenemos que investigar el millón o más de estrellas hasta los 1 000 años-luz en un tiempo razonable –por ejemplo, 30 años– podemos dedicar sólo unos 1 000 segundos a cada estrella. Por lo tanto, nos vemos obligados a depender de radiofaros que siempre estén brillando: señales fijas que estén siempre presentes.

Repaso a fondo del espectro

Si hay que detectar señales cuyas velocidades de desplazamiento son de 0,01 herzios por segundo a 1 herzio por segundo, las amplitudes de banda correspondientes del receptor son de 0,1 herzio a 1 herzio. Supongamos la velocidad de desplazamiento más baja y una amplitud de banda en el receptor de 0,1 herzio. Entonces el tiempo de respuesta para el receptor es de 10 segundos y la investigación de 100 megaherzios del espectro exigiría pasar 10 segundos como mínimo en cada uno de los 10^9 canales. Eso implicaría un tiempo de búsqueda 10^{10} segundos, es decir, 300 años por estrella. Uno de los mayores logros del estudio; Cyclops fue la reducción del tiempo de búsqueda por estrella de 300 años a 1 000 segundos.

El secreto de esta fantástica reducción de tiempo, o aumento de la velocidad de búsqueda, es el recurso a la enormemente rápida capacidad de transformación de Fourier de un sistema óptico. Me gustaría dedicar ahora unos cuantos minutos a mostrarles cómo funciona este sistema.

La mayoría de los ingenieros están familiarizados ya con el hecho de que la distribución de la amplitud del campo eléctrico en el plano imagen de una lente es la transformada de Fourier de la distribución de la amplitud compleja bidimensional sobre el plano de apertura de la lente. Este hecho se explota en holografía y filtrado de imagen y en síntesis de apertura en radioastronomía. No es tan conocido el hecho de que todo este poder transformador puede utilizarse con una señal unidimensional, como la señal de frecuencia intermedia de un sistema

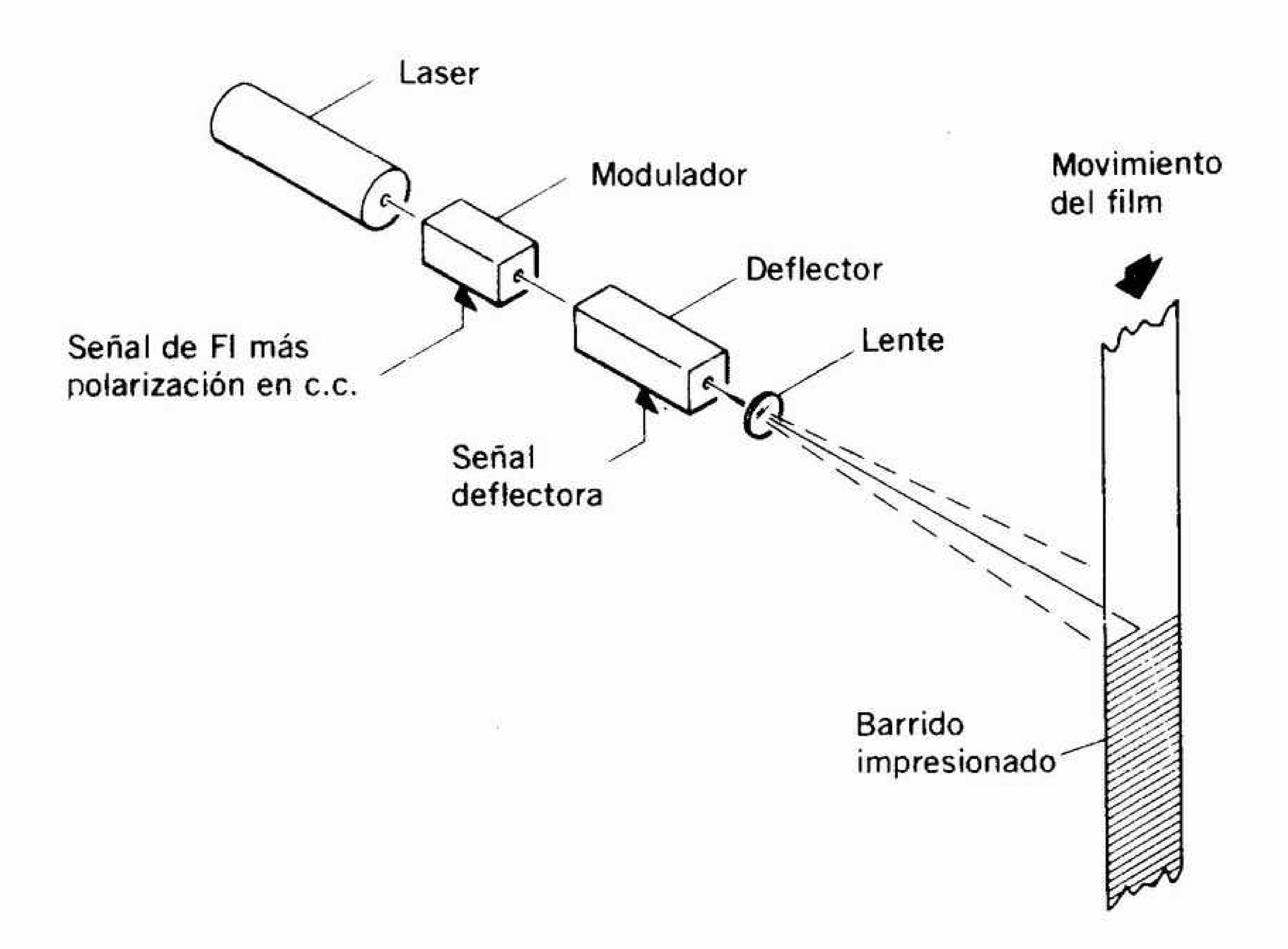


FIG. 33. Fase inicial de un sistema óptico de transformada de Fourier a gran velocidad para la búsqueda rápida en el espectro de señales interestelares. Véanse detalles en el texto.

de antenas. Esta posibilidad fue señalada por Robert Markevich de la Ampex Corporation.

La señal por analizar se separa primero mediante una serie de mezcladores y filtros en varias señales de banda base, de una amplitud de banda de 1 megaherzio aproximadamente cada una. Se polariza cada una de estas señales de 1 megaherzio de ancho para evitar los valores negativos y se registra luego en forma de líneas superpuestas sobre un trozo de película, como muestra la figura 33. Vemos que la señal se aplica a un modulador óptico para modular la intensidad de un rayo laser, que luego es desviado en forma de diente de sierra sobre una sección en movimiento de un filme fotográfico. El filme es revelado en un revelador rápido y pasa a través del marco de un analizador de espectro óptico, en el que toda la ventana está iluminada con luz coherente por otro laser, como puede verse en la figura 34. El marco del filme está en el plano focal frontal de una lente. La intensidad luminosa en el plano focal posterior consiste entonces en un espectro de potencia de la

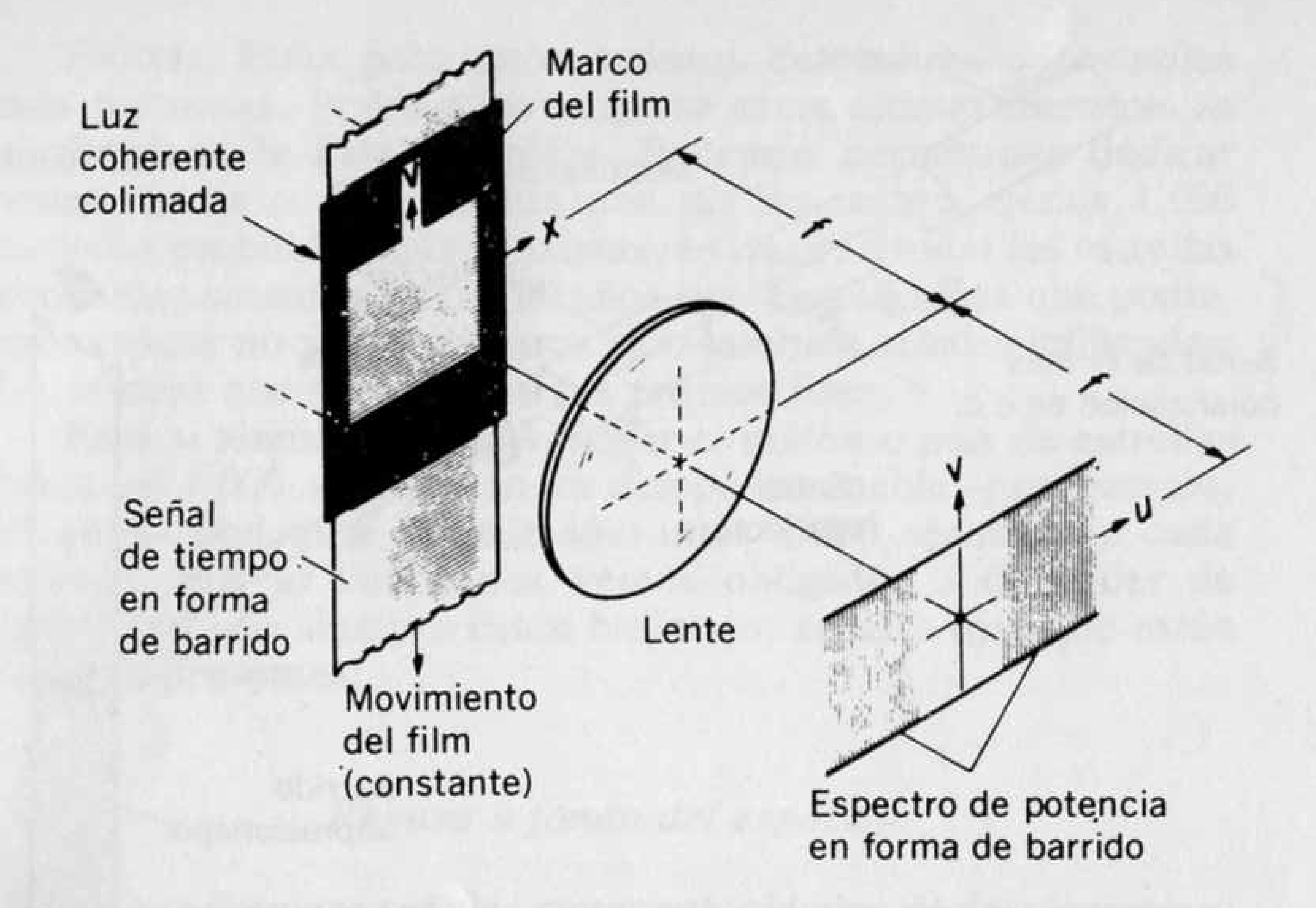


FIG. 34. Segunda fase del tratamiento del film para la búsqueda de frecuencias a alta velocidad. Véanse detalles en el texto.

señal registrada. La naturaleza se muestra aquí muy buena con nosotros, porque este espectro de potencia aparece también dispuesto convenientemente en forma de líneas de barrido, y no una sino dos veces.

Para comprender este resultado veamos la figura 35. Imaginemos que la señal de IF consiste en una única onda sinusoidal coherente e imaginemos que hay exactamente un número entero *n* de ciclos por línea explorada. Entonces los segmentos oscuros y claros de cada línea estarán situados directamente debajo de los de la línea superior y el filme en el marco del analizador consistirá en *n* barras verticales oscuras y *n* barras verticales claras, como se ve en la figura superior izquierda. Esta estructura de barras con eje vertical *a-a'* actúa como una red de difracción; por lo tanto, en el plano de la transformada encontraremos tres puntos brillantes: un punto en el origen *O*, debido a la componente continua sumada a la señal de IF y un punto en A_1 y en A_2, a ambos lados, debidos a la sinusoide.

Supongamos ahora que aumentamos ligeramente la frecuencia de la señal. Ahora los segmentos oscuros y claros de cada línea estarán situados ligeramente a la izquierda de los de la línea superior Continuamos teniendo una red de difracción,

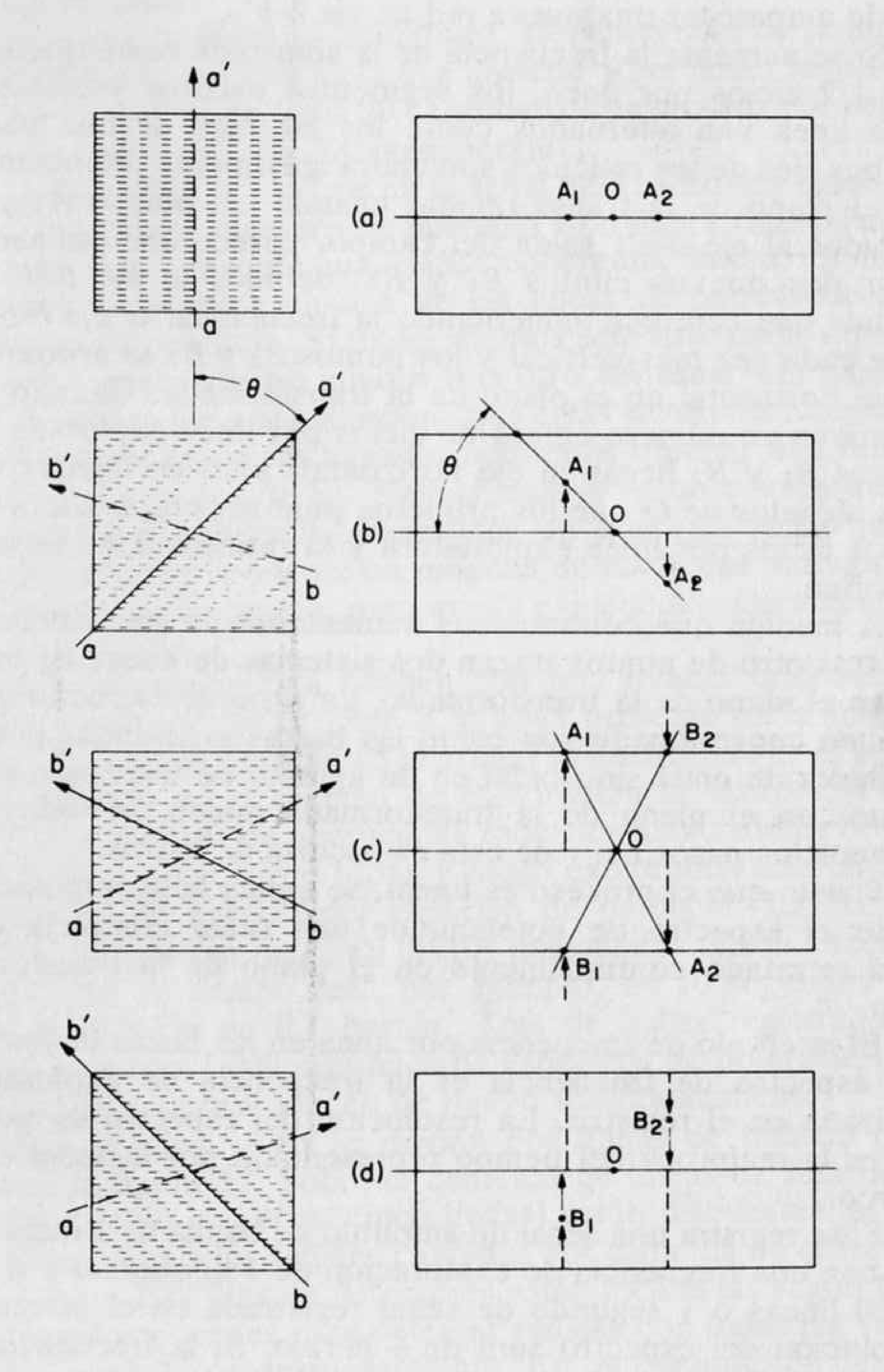


FIG. 35. Representación esquemática de la disposición adoptada por el espectro de potencia (ver figuras 33 y 34) en forma de barrido. Ver detalles en el texto.

pero el eje *a-a'* está ahora inclinado en un ángulo θ. Los puntos A_1 y A_2 giran también el ángulo θ: A_1 se desplaza hacia arriba y A_2 se desplaza hacia abajo. Su separación horizontal ha aumentado ligeramente porque el paso horizontal de la red es ahora ligeramente menor. Fíjense también que está empezando a aparecer una nueva red de eje *b-b'*.

Si se aumenta la frecuencia de la sinusoide hasta que haya $n + 1/2$ ciclos por línea, los segmentos oscuros y claros de cada línea van alternados como los ladrillos de una pared. Ambos ejes de los retículos son ahora igualmente prominentes. En el plano de la transformada, cuando los puntos A_1 y A_2 (debidos al eje *a-a'*) salen del campo, parece que ocupen su lugar dos nuevos puntos B_1 y B_2 (debidos al eje *b-b'*). A medida que continúa aumentando la frecuencia, el eje *b-b'* se hace cada vez más vertical y los puntos B_1 y B_2 se aproximan al eje horizontal en el plano de la transformada. Cuando hay de nuevo un número entero de ciclos por línea explorada, los puntos B_1 y B_2 llegan al eje horizontal, pero en lugares algo más alejados de *Q* que los primeros puntos porque ahora hay $n + 1$ ciclos por línea exploradora y la retícula tiene un paso más fino.

A medida que continuamos aumentando la frecuencia, un par tras otro de puntos trazan dos sistemas de líneas de barrido en el plano de la transformada. La serie de estructuras en el filme impresionado son como las barras producidas por un oscilador de onda sinusoidal en un aparato de televisión y los puntos en el plano de la transformada miden en todos los tiempos los pasos *x* e *y* de esta estructura de barras.

Puesto que el proceso es lineal, se aplica la superposición. Todo el espectro de potencia de una señal compleja quedará retratado continuamente en el plano de la transformación.

El intervalo de frecuencia por línea en las líneas de barrido del espectro de frecuencia es la frecuencia de exploración utilizada en el registro. La resolución del espectro de potencia es la recíproca del tiempo representado por la señal en el marco.

Si se registra una señal de amplitud de banda de 1 megaherzio con una frecuencia de exploración de 1 kiloherzio y si hay 1 000 líneas o 1 segundo de señal registrada en el marco, la resolución del espectro será de 1 herzio. Si la frecuencia de exploración es de 316 herzios y 3 160 líneas o están en el marco 10 segundos de señal la resolución será de 0,1 herzio. Éste es más o menos el estado actual de la técnica. Un solo

analizador óptico resolverá 1 megaherzio de señal en 10^7 canales de 0,1 herzios de ancho cada uno. Por lo tanto, para resolver los 200 megaherzios del «agujero del agua» en canales de 0,1 herzios necesitamos 200 analizadores para cada polarización recibida.

El gasto de filme es moderado. Depende sólo de la amplitud de banda *total* que haya que analizar y del poder resolutivo del filme, que es de unos 20 centímetros cuadrados por segundo para una banda de 200 megaherzios.

Supongamos ahora que en la señal de FI sólo hay ruido. En este caso, en el espectro de potencia sólo habrá ruido. Pero si además está presente una señal coherente, habrá un punto brillante persistente en una de las líneas de barrido de cada espectro de potencia. Si fotografiamos *sólo esta línea exploradora* a medida que un cuadro tras otro del filme van pasando por el analizador y si sobreponemos estas sucesivas fotografías en forma de líneas de barrido, podremos obtener una imagen como la de la figura 36. Vemos una señal coherente que se desplaza en frecuencia. Fijémonos en que esta señal no era particularmente evidente en ninguna de las líneas individuales de barrido de la imagen, pero queda evidenciada claramente en la imagen total.

Si exploramos esta imagen con una rendija orientada de modo exactamente paralelo a la línea presente en la imagen, obtendremos un gran pulso al cruzar la línea. Éste es el principio utilizado en el sistema de elaboración de datos Cyclops.

Los espectros de potencia de todos los analizadores ópticos son proyectados sobre tubos y luego explorados a lo largo de las líneas de barrido del espectro de potencia. Las señales video se registran luego en discos magnéticos. Cada cuadro es registrado en tiempo real, por ejemplo, en 10 segundos para una resolución de 0,1 herzio. Tras de haber registrado 100 cuadros o tras 1 000 segundos de espectros de potencia, todos los cuadros se reproducen de nuevo simultáneamente.

Las señales video se envían por líneas de retardo como indica la figura 37. Sobre el centenar de líneas de retardo (en la figura sólo aparecen cinco líneas) están dispuestas las filas de detectores y las señales captadas por cada fila de detectores se suman. Las filas de detectores están inclinadas según todos los ángulos posibles para detectar señales con todas las velocidades posibles de desplazamiento. En un conjunto de detectores –cuya inclinación corresponde a la velocidad de desplazamiento–, todos los pulsos registrados de la señal coherente se sumarán en fase y el detector excederá el umbral a que podría

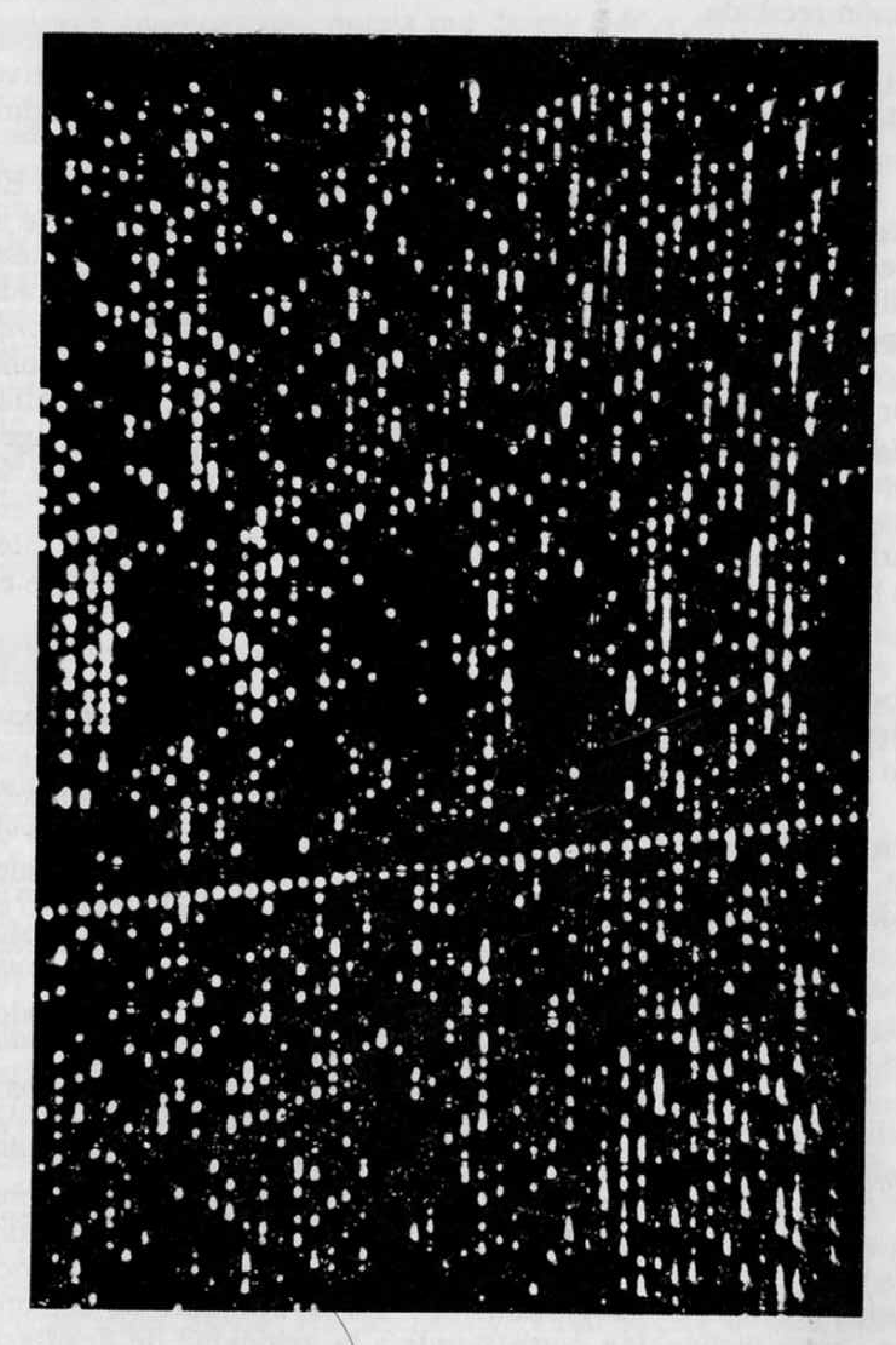


FIG. 36. Representación final de una señal desplazándose en frecuencia detectada por el método de la transformada de Fourier de gran velocidad, discutido en el texto.

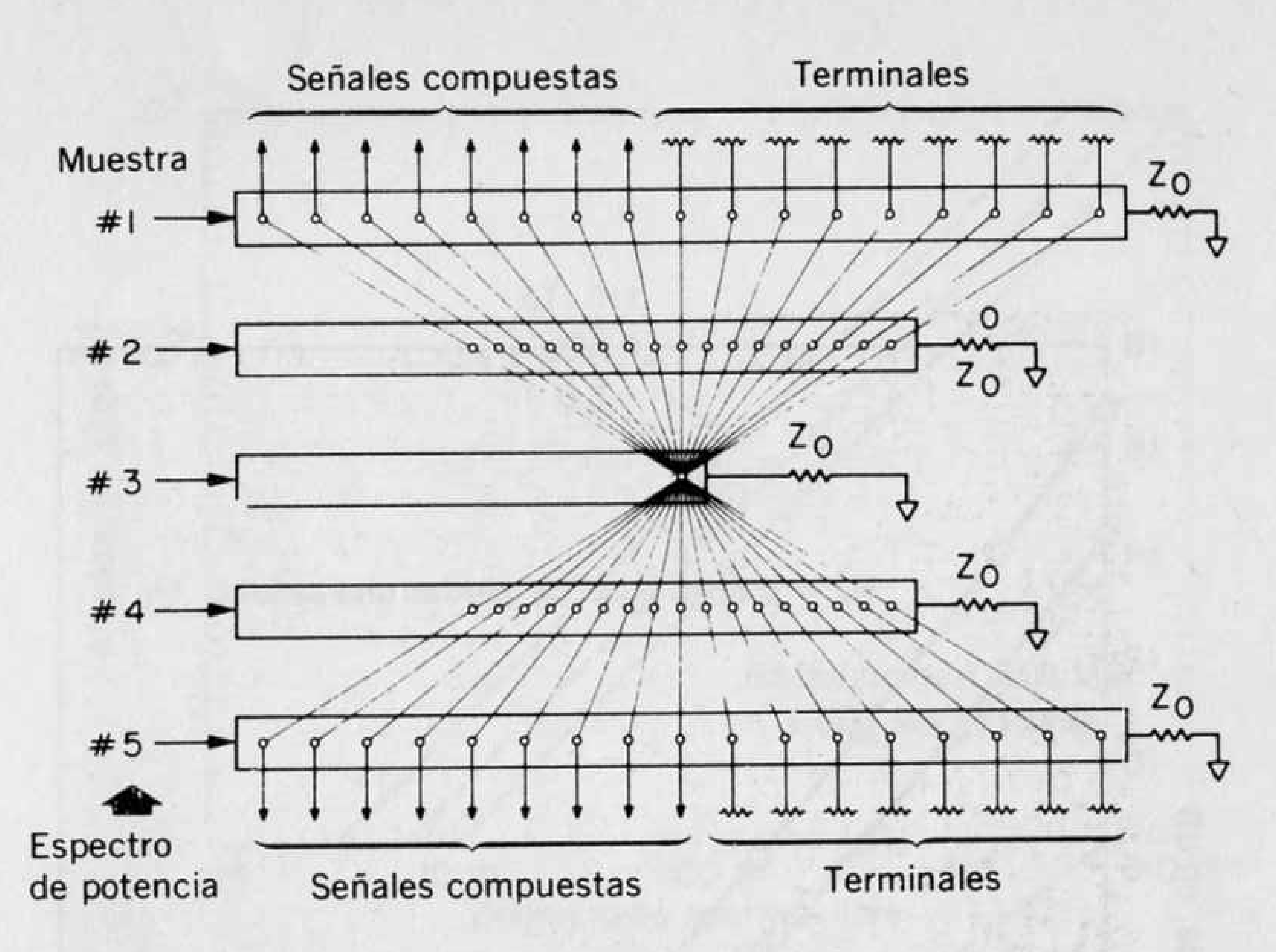


FIG. 37 Análisis de las líneas de retardo para todas las velocidades de desplazamiento posibles a fin de detectar señales coherentes. Ver detalles en el texto.

llegar únicamente con ruido. Cuando esto sucede, es probable que esté presente una señal coherente.

La figura 38 muestra los resultados del detector Cyclops. Las curvas están trazadas para una probabilidad total de falsa alarma de un 10 por ciento por 100 megaherzios de amplitud de banda. Los números en las curvas son las probabilidades de perder la señal. Vemos que con 100 integraciones la probabilidad de perder la señal es sólo del 10 por ciento si la razón de la potencia de la señal recibida a la potencia del ruido en la amplitud de la banda de resolución del analizador es la unidad, o 0 decibelios.

Esto significa que con 1 000 segundos de tiempo de observación por estrella podemos detectar con confianza una señal cuya potencia sea igual a la potencia de ruido en una banda de 0,1 herzios, o 90 decibelios por debajo de la potencia en toda la banda recibida de 100 megaherzios. No sabemos que exista ningún otro proceso de detección que llegue a igualar el orden de magnitud de este resultado.

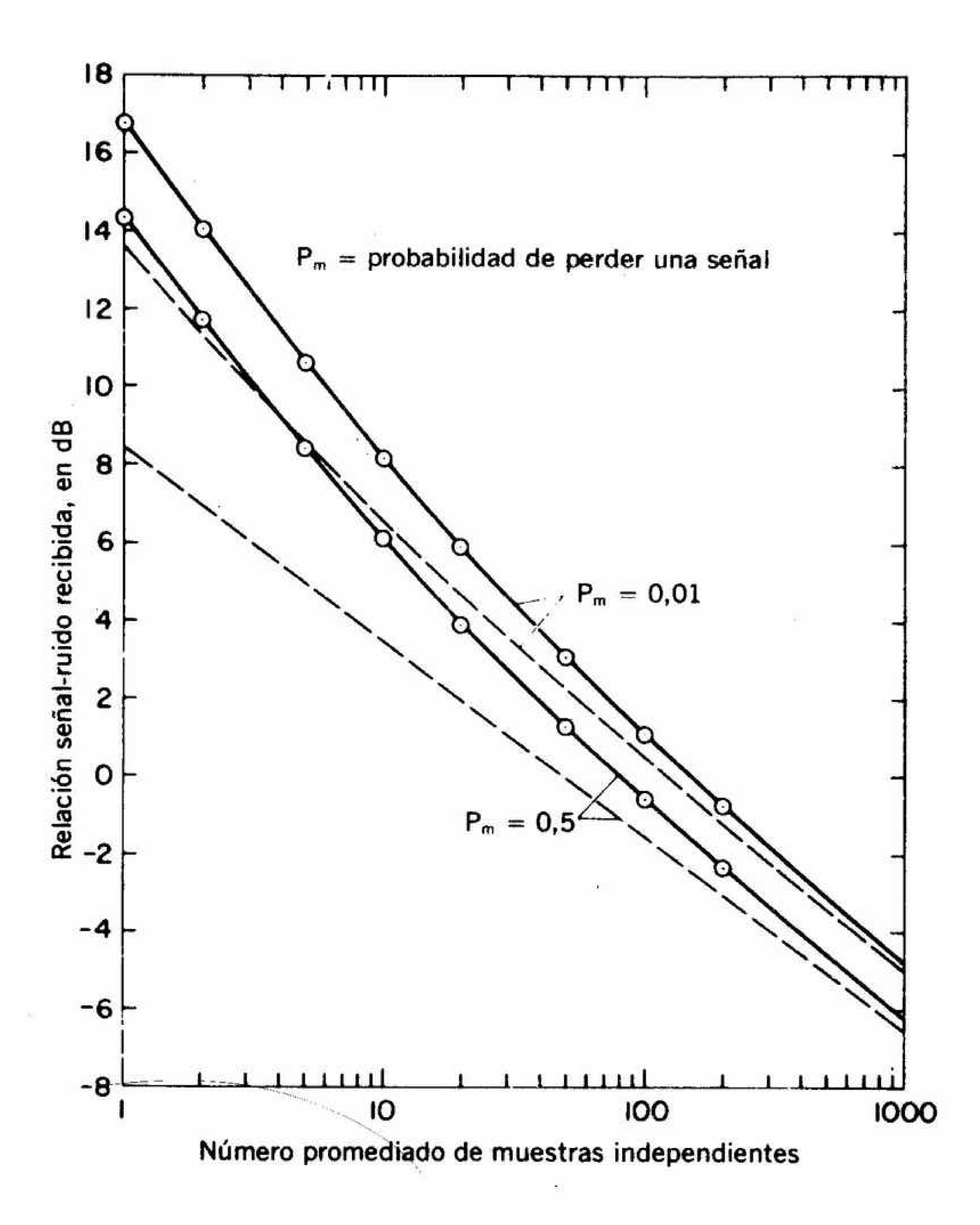


FIG. 38. Probabilidad de que pase por alto una señal con el propuesto sistema de detección Cyclops, en función de la relación señal-ruido y del número promediado de muestras independientes.

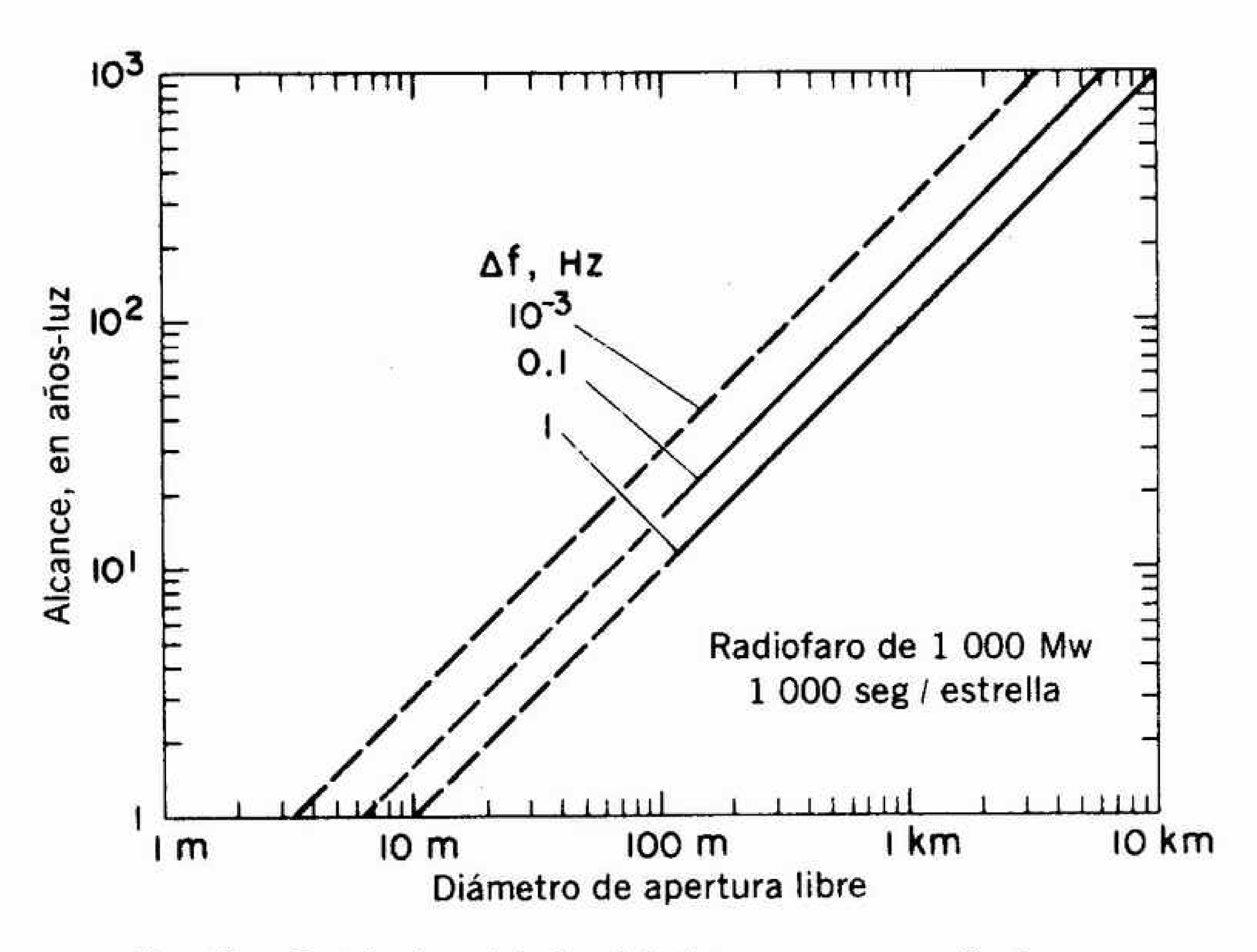


FIG. 39. Resultados globales del sistema propuesto Cyclops.

Resultado general

La figura 39 muestra el resultado general de un sistema con una temperatura de ruido de 20º K que use el detector Cyclops propuesto y tenga un tiempo constante de búsqueda de 1 000 segundos por estrella. La curva inferior supone un poder de resolución de 1 herzio en el analizador de espectro y, por lo tanto, que se suman 1 000 espectros. Esto permitiría solamente velocidades de desplazamiento doppler de hasta 1 herzio por segundo. Se cree que éste es el rendimiento límite máximo. La curva superior presupone una amplitud de canal de 10^{-3} herzios sin suma de espectros. En este caso la velocidad doppler tendría que ser de 10^{-6} herzios por segundo o menos.

Vemos que para detectar un radiofaro omnidireccional de 1 000 megavatios a una distancia de 1 000 años-luz necesitaríamos una antena con una apertura clara de unos 5 kilómetros.

La tabla 5 da el rendimiento que podía obtenerse en el sistema Ozma utilizado por Frank Drake en 1960 y lo compara con el de un sistema Cyclops propuesto de 5 kilómetros.

TABLA 5
COMPARACIÓN DE OZMA CON EL SISTEMA CYCLOPS PROPUESTO

	Ozma (1960)	Cyclops de 5 km (1971)
Diámetro de antena	27 m	5 000 m
Eficiencia de la antena	0,5	0,8
Temperatura de ruido	350° K	20° K
Amplitud de banda	100 Hz	200 MHz
Amplitud del canal	100 Hz	0,1 Hz
Tiempo de integración	100 seg	10 seg
Velocidad de la búsqueda espectral	1 Hz/seg	2×10^5 Hz / seg
Sensibilidad límite	$1,7 \times 10^{-23}$W / m²	$1,7 \times 10^{-30}$W / m²
Cifra de mérito	1	2×10^{12}

Vemos que el sistema Cyclops puede investigar el espectro 200 000 veces más rápido y tiene una sensibilidad diez millones de veces superior. El producto de estos dos factores da la figura de mérito de Cyclops sobre Ozma: 2×10^{12}. Tiene cierto interés notar que la sensibilidad límite del sistema Cyclops es de unos dos fotones por segundo por millón de metros cuadrados. Ningún sistema óptico podría aproximarse a esta sensibilidad y los fotones ópticos son 100 000 veces más caros (es decir, más enérgicos).

No todo el aumento de eficacia de Cyclops con respecto a Ozma se debe al progreso técnico. Debemos recordar que el sistema Ozma costó del orden del millón de dólares mientras que el sistema Cyclops de 5 km costaría más de 10 000 millones de dólares.

¿Hay que intentarlo?

Nuestros cálculos dicen que la tecnología de hoy en día es capaz de emprender una búsqueda muy efectiva de señales extraterrestres. La cuestión que debemos plantearnos es la siguiente: ¿Vale la pena gastar aproximadamente la mitad del coste del programa Apolo para intentar esta búsqueda?

La barrera mayor para un gasto de este tipo es que no podemos *garantizar* el éxito. Una empresa así representa una jugada muy costosa. Enfrente de este riesgo debemos ponderar los beneficios potenciales. Lo más probable es que en la Galaxia hayan existido desde hace cuatro o cinco mil millones de años civilizaciones inteligentes. Parece muy probable que

muchas de ellas hayan establecido contacto interestelar. En este caso la comunicación existió entre las civilizaciones desde edades remotas, y pueden existir muy bien radiofaros para ayudar a las razas jóvenes como nosotros a entrar en la comunidad galáctica.

Algunos de nosotros que estudiamos el problema desde hace mucho tiempo pensamos que toda la pasada historia humana puede ser un simple preludio al futuro increíblemente excitante que nos aguarda como participantes en una cultura galáctica. Como mínimo podríamos confiar en obtener el acceso a una herencia de conocimientos de remota antigüedad. ¿Qué astrónomo quedaría indiferente ante fotografías de la Galaxia y del universo tomadas hace 5 000 millones de años? ¿No nos gustaría a todos aprender las historias naturales de la vida en toda la Galaxia y las estructuras sociales que han conducido a la supervivencia de las culturas más antiguas?

No puedo concebir que el hombre, incapaz de viajar a las estrellas, deje algún día de alcanzar otra vida a través de la comunicación interestelar. ¿Es demasiado pronto para iniciar la búsqueda? ¿O quizá en el año 2001 ya no seremos una especie aislada sino que empezará una nueva época en la evolución de la vida sobre la Tierra?

BRAUDE: Me gustaría preguntar al doctor Oliver: ¿por qué tantas antenas si se puede utilizar un sistema de dos espejos con haces anchos? Si se disponen con cables pueden servir para recibir señales de zonas muy amplias del cielo. Con varios conjuntos de receptores es posible obtener prácticamente un número cualquiera de haces que miren hacia diferentes direcciones en partes diferentes del cielo.

OLIVER: El número elevado de antenas receptoras que he citado es necesario simplemente, con las estructuras de hoy en día, para conseguir la apertura total requerida. Las técnicas de síntesis de apertura que pueden proporcionar imágenes de alta resolución en radioastronomía no resultan aplicables para el problema de las comunicaciones interestelares, donde se necesitan aperturas colectoras grandes simultáneas. En el Proyecto Cyclops estudiamos sistemas para tener imágenes radio del cielo lo más grandes posibles, debido al limitado campo de visión de cada elemento. Dentro de los mil años-luz hay mucho menos de una estrella por campo de visión de los elementos del sistema. Por lo tanto, estas ideas a base de imágenes no parecen prometer mucho en relación a la búsqueda simultánea

de muchas estrellas a no ser que uno pase a distancias substancialmente superiores. Pero presentan grandes ventajas para apuntar adecuadamente el sistema y para hacer el mapa del cielo.

BURKE: Quería solamente dar un breve ejemplo del papel de la tecnología dentro del dominio radio. La antena de Westerbrook en Leiden, en los Países Bajos, es un sistema que se inspira mucho en la filosofía explicada por el doctor Oliver y otros. Efectúa un análisis de Fourier del cielo. La figura 40 contiene una imagen radio de M51, la bien conocida galaxia espiral con una galaxia acompañante cerca de ella. La imagen fue hecha por W Jaffer a partir de datos de Mathewson y otros.*

MINSKY: ¿A qué frecuencia?

BURKE: Se desarrolló en el observatorio una imagen del cielo en las longitudes de onda de radio, a una longitud de 21 cm, procesando las componentes de Fourier y luego presentando los contornos de intensidad en un osciloscopio.

TOWNES: ¿Es un espectro de línea?

BURKE: No, es un espectro continuo, radiación sincrotrónica no térmica continua de M51 Por ahora su resolución está limitada.

TOWNES: Es muy bonita. ¿Cuál es la resolución?

BURKE: La resolución es de 22 segundos de arco.

El único comentario adicional que me gustaría formular es que la frecuencia se eligió en principio hace sólo unos pocos años sobre bases técnicas muy racionales, como las que se han estado discutiendo aquí. Se están construyendo ahora sintonizadores para tres veces la actual frecuencia, porque es evidente que los resultados del continuo serán allí mucho más interesantes. Esto lo digo como un aviso contra la idea de que la primera y segunda leyes de la termodinámica constituyan una guía para elegir exactamente las longitudes de onda.

* D. S. MATHEWSON, P. C. VAN DER KRUIT y W N. BROUW, «A High-Resolution Radio Continuum Survey of M51 and NGC 5195 at 1 415 MHz», *Astronomy and Astrophysics* 17, 1972, pp. 468-486.



FIG. 40. Reconstrucción mediante la síntesis de apertura de Fourier de la galaxia espiral M51, a partir de los datos de Mathewson y otros.

GOLD: Un comentario general sobre cuestiones de transmisión y recepción. El doctor Oliver y otros dijeron que deberíamos intentar las dos. La simple recepción me daría información ahora. Pero si encuentro algo de interés, la transmisión me dará información para dentro de unos cuantos centenares de años. Recuerdo una frase en la Cámara de los Comunes pronunciada hace unos años: «¿Por qué tengo que preocuparme de la posteridad? ¿Qué ha hecho la posteridad por mí?»

TOWNES: Me parece que algunos de los puntos cruciales son, en primer lugar, que la comunicación es posible ahora. En segundo lugar, que no sabemos en realidad gran cosa sobre su probabilidad; el número de sistemas que sustentan la vida en nuestra Galaxia puede estar entre cero y quizá 10^8 o 10^9. Desde luego que si uno cree en la filosofía del obispo Berkeley, tal civilización es inexistente. El tercer punto concreto que considero crucial es el crecimiento muy rápido de la tecnología, por lo menos dentro de nuestra civilización y quizás en otras formas de sociedades inteligentes. Cada cual conoce este incremento casi vertical de la tecnología con el tiempo y sin embargo creo que no lo hemos tenido lo bastante en cuenta en nuestras discusiones. Además por lo menos ahora vemos que hay algunas técnicas que pueden lograr la comunicación, y yo creo que podemos suponer la existencia de otras técnicas que todavía no hemos imaginado.

Quisiera mencionar finalmente el gran número de elementos del problema en los que entra en juego un juicio subjetivo, y que casi convierten el campo en una no ciencia, que sin embargo continúa siendo muy interesante. Por ejemplo, uno de estos juicios subjetivos intervino en la discusión entre el doctor Sagan y yo (pp. 207-208): Sagan cree que las civilizaciones mucho más avanzadas que nosotros en general no estarán interesadas en comunicar. Quizá tenga razón, pero mi propio juicio es que nuestra experiencia indica lo contrario. Concretamente, tenemos un interés especial en comunicar con pueblos de la Edad de Piedra, que pueden estar atrasados miles de años con relación a nosotros en el aspecto tecnológico. Y no se trata de hormigas, sino de personas, de individuos que tienen casi la misma capacidad intelectual que nosotros. Estamos tan interesados que a menudo destruimos tales civilizaciones. Sin embargo, reconozco que puedo estar equivocado. Digo simplemente que existen estas diferencias insolubles de juicio.

Me parece prudente en tal situación llevar a cabo unos cuantos intentos en varias direcciones diferentes, porque no podemos estar seguros de ninguna. Para mí un precepto esencial es: ¿por qué realizar al fin y al cabo experimentos difíciles cuando hay por hacer unos cuantos fáciles? Creo, por lo tanto, que deberíamos estudiar todas las frecuencias razonables donde la observación no sea demasiado cara y donde el número de técnicas diferentes dejan un margen a los juicios individuales de los distintos científicos sobre lo que hay que hacer.

Por otra parte, el gran valor de este sistema reside en que nuestro problema repercute sobre muchas ciencias importantes. Alguien, por ejemplo, podría intentar centrarse en la detección y estudio de los planetas de otras estrellas. Otro podría subrayar la historia evolutiva de planetas y de estrellas. Otro preferiría la evolución de la vida en nuestro planeta, es decir, desde el punto de vista básico de la bioquímica. Otro podría subrayar el estudio eficiente de la radiación y su manejo, o quizá la tecnología de las naves espaciales. Me parece que todas estas ciencias pueden aportar una contribución muy importante y en cualquiera de ellas podemos conseguir una respuesta muy útil, que aclarará las cosas; constituyen de por sí contribuciones muy valiosas a la ciencia, que podemos muy bien permitirnos.

Déjenme hablar concretamente un poco del campo laser. Me impresionó mucho el informe del doctor Oliver, que representa un estudio muy valioso y útil, especialmente en la región radio. No creo realmente que se haya aplicado un tipo correcto de esfuerzo e imaginación a la exploración de las posibilidades de otras regiones de frecuencia. Además, el ritmo del desarrollo es un factor muy importante. El profesor Pariisky ha afirmado que se ganan dos o tres órdenes de magnitud en la relación señal-ruido (esencialmente) cada cinco o diez años. Quizás el desarrollo más lento, pero sin embargo importante es el ritmo total de productividad de la raza humana, que se duplica cada diez años. Me parece que estos datos implican la necesidad de dedicarse especialmente a las estrellas más próximas, porque el hecho de comunicar con estrellas situadas, por ejemplo, a 1 000 años-luz o más significa que en el viaje de regreso deberemos utilizar una tecnología muy superada. La otra comunicación podría esperar fácilmente 100 años y con nuestro ritmo de crecimiento podría resultar entonces mucho más fácil: quizá llegaremos a alcanzar algún tipo de saturación en la exploración de las posibilidades físicas.

Quizá uno de los campos donde el avance sea de los más rápidos es el de la electrónica cuántica y los lasers. Durante la

última década la potencia de transmisión disponible en lasers ha aumentado un orden de magnitud casi cada año. No veo motivos para que esto se detenga, y, por consiguiente, podemos suponer como mínimo de un orden de magnitud cada dos años durante cierto tiempo. He visto que el doctor Drake utilizó en su diagrama una cifra para los lasers que creo que está superada ya en unos dos órdenes de magnitud. Creo que la potencia actual máxima en onda continua publicada es de 30 kilovatios, y pienso que la propuesta del doctor Oliver de calcular 1 megavatio es muy razonable para el futuro casi inmediato. La mayor parte de la discusión de hoy tendía a optimizar la transmisión de potencia: es decir, a minimizar la cantidad de potencia requerida. Pero si reconocemos que los materiales y la construcción tienen cierto coste, quizá necesitemos optimizar también otras cosas. La cantidad de potencia puede ser indefinidamente grande y relativamente barata. Hay que considerar en el mismo sentido, por ejemplo, los problemas del viento. Si en la atmósfera soplan vientos muy intensos quizá convenga minimizar el tamaño de una antena y maximizar su rigidez.

Una segunda zona donde se han producido avances recientes en lasers es en la coherencia de transmisión a través de la atmósfera. Hemos hecho recientemente algunas mediciones que demuestran que un telescopio de 120 pulgadas, por ejemplo, tiene un límite de difracción de 5 micrones; en otras palabras, la apertura utilizable de modo inherente aumenta en función de la longitud de onda con una rapidez considerablemente superior al aumento lineal. Por lo tanto yo me sentiría inclinado a utilizar antenas de 10 micrones: unas longitudes de onda considerablemente superiores a las que supone el doctor Oliver. Una antena de 10 metros para 10 micrones me parece muy razonable y no muy cara, y probablemente estaría limitada por la difracción, aunque no sabemos el tamaño máximo.

El doctor Pariisky dijo que las nuevas técnicas permiten eliminar todavía más el problema de la incoherencia de fase. Dentro de unos dos años una transmisión de 10 micrones desde un satélite permitirá un estudio más profundo de las propiedades atmosféricas, y en especial permitirá corregir a voluntad la diferencia de fase entre los elementos de un sistema de antenas, porque su señal de prueba es perfecta para la corrección. Por lo tanto, también hay muchas mejoras posibles en este sentido.

He hablado de este rápido ritmo de cambio tecnológico porque creo que es arriesgado intentar tomar decisiones absolutas o muy absolutas en este punto. Dentro de cinco años nuestras posibilidades habrán cambiado, y cualquier civilización que esté a un centenar de años después de nosotros puede ver las cosas de un modo realmente distinto. Todos estos tiempos son muy cortos en comparación con la escala temporal que debemos tener en cuenta.

Puedo imaginarme una civilización avanzada que escuche muy cuidadosamente en todos los intervalos de frecuencia a todas las estrellas y planetas situados en su proximidad, quizá por motivos de defensa, para dar la alerta, quizá simplemente por curiosidad, para llevar a cabo un estudio a fondo de todos los cambios posibles en los sistemas estelares y planetarios próximos. Permítanme subrayar de nuevo la prioridad que yo considero deben tener las estrellas más cercanas. No solo porque son más fáciles de examinar, sino porque hay que suponer que despertaremos más interés en los que están en las estrellas próximas.

Todos estos comentarios son realmente cuestiones de énfasis. No discuto la ciencia concreta que se ha aplicado al caso, pero en algunas cuestiones habría preferido cifras distintas. Creo que hay además un punto concreto en el que esta ciencia no ha acabado de situarse en la perspectiva correcta. Me refiero al ruido en las regiones infrarrojas submilimétricas. El ruido básico que el doctor Oliver discutía es ciertamente muy correcto para todo tipo de detector lineal, pero en el caso de un detector no lineal, como un detector de fotones, se limitó a decir con palabras que había una diferencia substancial. Una simple afirmación puede conducir simplemente a lo que Drake y Oliver han escrito ya, pero yo creo que hay un importante punto adicional. Si uno calcula la relación señal-ruido de un fotón, el ruido ha de entrar como $\exp(-h\nu/kt)$, lo que para una temperatura de 3° K y un fotón de 10 micrones, por ejemplo, significa cerca de 10^{-200}. Sin embargo esta afirmación es demasiado simple. Lo que uno dice es que si se detecta un solo fotón, la probabilidad de que se trate de un error es de 10^{-200}.

La ventaja de ello es que con este sistema idealizado se pueden investigar simultáneamente muchos modos. Se podría investigar 10^{200} modos y tener una buena probabilidad de que la relación señal-ruido sea 1 : 1. Por lo tanto, al diseñar un nuevo sistema se podría investigar todo el espectro de 10 micrones a la vez sin ruido de fondo; ven, pues, que estas consideraciones cambian mucho las cosas.

Por otra parte, si se trata de transmitir información, la impresión que uno saca de las fórmulas es esencialmente

correcta. Es decir, que para la búsqueda esto presenta una ventaja substancial en la transmisión de la información y hay que tomar una temperatura de ruido igual a $h\nu/k$.

La cosa es todavía más complicada porque este factor no es aún correcto. Hay, como es lógico, la radiación solar, la radiación del fondo estelar, etc. Creo, pues, desde un punto de vista práctico, que estas radiaciones de fondo en lugar de un ruido quizá de 10^{-200}, darán posiblemente 10^{-14}; me parece que éste es un factor importante que afecta la velocidad de una posible búsqueda.

En cuanto a las ventajas relativas entre las frecuencias laser y de radio, creo que Oliver dijo unas cuantas cosas esencialmente correctas y pertinentes. Pero hay el punto de vista diferente, según el cual si deseamos comunicar, por ejemplo, con estrellas situadas sólo a cinco o diez mil años-luz, los lasers y otros métodos son realmente muy prácticos. Creo que el intervalo milimétrico y submilimétrico, como he dicho antes, constituye también una posibilidad muy razonable. Depende de nuevo de lo que vayamos a optimizar. Pero yo diría que una antena de 10 metros para 10 micrones es probablemente más ventajosa que una antena de 1 kilómetro para microondas. Esta ventaja se da únicamente en ciertas suposiciones concretas. Si las suposiciones son distintas, las ventajas también lo serán.

Creo que una ventaja substancial de las microondas, que quizá no se indicó con suficiente fuerza, es que si uno desea observar un número muy grande de estrellas a gran distancia, casi cualquier haz de microondas abarcará un gran número de estrellas a la vez. Creo que la inclusión en el haz de un gran número de estrellas constituye una ventaja considerable, si uno desea observar a distancias muy grandes. No creo que esto sea tan importante en distancias menores, de unos cuantos años-luz.

Hago tanto hincapié en los lasers no porque desee vender lasers, sino como una ilustración de otras posibilidades. Es importante reconocer que quizá no hayamos pensado con bastante imaginación o con bastante convicción en otros métodos.

Me gustaría también mencionar otro tipo de técnica, que no comprendo muy bien, pero que no veo motivo para que no sea razonable: se trata del envío real de pequeñas naves espaciales. Me pregunto si se ha explorado lo bastante bien esta posibilidad y si una civilización distante que deseara seriamente entrar en contacto con nosotros no podría enviar una nave espacial con destellos e imágenes adecuados, etc. No estoy suficientemente familiarizado con los números para poder sostener que sea algo completamente razonable, pero quizá ha llegado ya su momento. Confío, pues, en que todos consideraremos una variedad de métodos para que el mañana nos traiga el descubrimiento. Puede llegar de un modo inesperado, a través de una ruta completamente diferente.

DRAKE: Me gustaría volver brevemente a la cuestión de la comparación entre los sistemas de comunicación óptico y de radio. El profesor Townes nos ha llamado la atención sobre el rápido crecimiento de los niveles de potencia de los lasers. Creo que este rápido progreso refleja en parte, o quizá del todo, el hecho de que el laser sea un invento que ha llegado retardado, mucho después de que la tecnología mundial estuviera preparada para él. Ahora el invento está superando rápidamente su retraso en su desarrollo para ponerse a la altura de los demás métodos de generación de potencia; por lo tanto, este crecimiento rápido no se sostendrá, sino que cuando la potencia del laser se aproxima a la de los métodos de generación de radio, el ritmo de crecimiento se pondrá al nivel experimentado por la transmisión de radio.

No hay duda de que cuando los niveles de potencia hayan alcanzado un nivel elevado, como el conseguido por la radio, se llegará a una situación donde para conseguir niveles de potencia todavía mayores lo más económico sea sumar sistemas en «paralelo» eléctrico, si así lo desean. De ese modo el coste de sistemas de potencia superior sigue linealmente el nivel de potencia, lo cual constituye una ley muy buena.

Esto significa para mí que se puede establecer una comparación justa entre los sistemas de laser y de radio. Si se tiene en cuenta que los lasers pueden alcanzar pronto 1 megavatio, como sugerimos el doctor Oliver y yo, se podrá comparar la efectividad de sistemas de coste similar que utilicen tales transmisores en las dos regiones de ondas. De hecho el ejemplo que di antes (pp. 228-232) se basaba en esta idea. Dije lo que sucedía al utilizar un laser de 1 megavatio en lugar de un laser de 1 vatio.

Para poner un ejemplo, el telescopio de Arecibo con un transmisor de 1 megavatio cuesta aproximadamente lo mismo que un telescopio de 200 pulgadas. Se puede ser generoso con el sistema laser diciendo que un telescopio de 200 pulgadas más un laser de 1 megavatio es igual en precio a un reflector de Arecibo con un transmisor de 1 megavatio, y que en cada caso podrían construirse sistemas mayores poniendo en para-

lelo esos sistemas. Es evidente que las ventajas o desventajas relativas no variarán.

El sistema que yo describí favorece la técnica de radio –el telescopio de Arecibo más un transmisor de 1 megavatio por un factor de 10^3. Creo que sistemas incluso mayores, por la razón expresada, conservarían la misma ventaja relativa para un gasto monetario dado.

No hay duda de que pueden darse desarrollos técnicos que desplacen la balanza a un lado u otro, pero es muy difícil superar un factor de 1 000. Por lo tanto, yo diría que es probable, pero no seguro, que la ventaja esté en favor de un sistema radio.

TOWNES: Creo que la respuesta adecuada en relación a la potencia consiste en reconocer que en el futuro inmediato la potencia de un laser estará limitada primariamente por el coste del cobre. Sin embargo hay otros factores que no creo que se hayan tenido lo bastante en cuenta. Un factor, por ejemplo, es la efectividad que puede darse a la búsqueda, y que llega a 10^8, posiblemente a 10^{10}, un factor que realmente no entra en la fórmula dada por el doctor Drake; un factor de 10^8 o de 10^{10} no es algo que cambie substancialmente las cosas. El modo de búsqueda no es el único modo posible, y en relación a la información creo que la fórmula que dio el doctor Drake es muy correcta. Sin embargo, inicialmente el modo de búsqueda es quizá lo más importante. Cuando se ha localizado algo y se puede encontrar, el factor 10^8 es bastante alto.

En cuanto al coste, quisiera decir también que es muy desorientador utilizar el coste del telescopio de 200 pulgadas como guía para el coste de un telescopio moderno de 10 micrones. Yo, por ejemplo, propondría estampar tales telescopios. En el laboratorio hemos fabricado espejos de este modo realmente muy buenos. El coste inicial para construir una superficie pudiera ser comparable al del telescopio de 200 pulgadas, aunque las técnicas han evolucionado considerablemente y una precisión para las longitudes de onda de 10 micrones sería desde luego muy inferior a la que tenemos con longitudes de onda ópticas 20 veces más cortas.

Se llega, pues, a la cuestión del coste del material. Si es posible la estampación, el factor limitante podría ser el coste del material, o yo diría que el factor limitante podría ser la fragilidad de las estructuras en las tormentas. Si el factor limitante es el coste del material, el tamaño de la antena resulta muy importante y esto favorece acentuadamente las

longitudes de onda cortas. Repito que no pretendo dar respuestas completas; digo únicamente que hay muchos factores que en mi opinión todavía no se contrapesan como uno podría hacerlo.

OLIVER: Me gustaría pedir al doctor Townes que comentara dos puntos. Estoy de acuerdo en que pueda haber métodos ingeniosos para construir espejos, como usted sugiere, pero tenemos que admitir que en la zona de las frecuencias ópticas debemos conseguir esencialmente la misma superficie receptora en cualquier frecuencia de que hablemos, de modo que no veo en ello una gran ventaja de coste, aunque quizá la tenga.

El segundo punto que me preocupa es el siguiente: creo que usted afirma que podríamos buscar a la vez un espectro muy ancho, a causa de descenso muy rápido del fondo al interrumpirse la radiación térmica, pero en mi opinión esto deja de lado el fondo enorme de la estrella primaria del planeta que intentamos detectar. ¿Tiene algún método para evitar este fondo?

TOWNES: Permítame responder primero a la segunda pregunta. La radiación del cuerpo negro a 3° K daría una ventaja en esta formulación exponencial de 10^{200}. Esto no es realista debido al fondo de la estrella. Si uno tiene en cuenta el fondo de la estrella, la ventaja es de 10^8 o 10^{10}. Si uno no está seguro de dónde se encuentra el planeta, no cuesta nada con un fondo tan bajo observar en las regiones oscuras del cielo en la zona de la estrella.

En relación a la primera pregunta sobre el tamaño, sabemos que hay dos factores. Para el receptor cuenta la superficie total. Para el transmisor se trata de una comparación de superficie y longitudes de onda. Hay que tener en cuenta ambos factores para juzgar lo que sería el sistema conjunto. Aunque nosotros podríamos invertir sólo en el coste del receptor, alguien tiene que decidirse respecto al transmisor. Podrían suponer, por ejemplo, que estamos bastante avanzados y tratarían de usar el sistema más barato y pequeño en la parte transmisora. Creo que hay que tener en cuenta ambas partes. El peso que uno les dé depende de si decidimos cargarles el bulto a ellos o a nosotros.

MINSKY: Supongo que al doctor Townes le preocupa la existencia en su planeta de tempestades o algo parecido.

TOWNES: Exactamente.

MINSKY: En Júpiter o en un lugar de este tipo, no se podría construir una antena mayor que un tamaño dado.

OLIVER: Dudo que con tales tormentas la atmósfera pueda haber conducido a la vida.

SAGAN: Yo deduciría precisamente lo contrario.

KARDASHEV: En la región infrarroja y submilimétrica no podemos observar valores tan bajos del fondo. Esta región se ha estudiado poco, pero hoy estamos muy familiarizados con el hecho de que en esta región hay emisión termal del polvo interestelar y muchas líneas moleculares.

GINDILIS: No tenemos en cuenta un factor importante: la absorción interestelar. Cuando observamos a través del plano galáctico, en las longitudes de onda ópticas, la absorción es igual a dos magnitudes estelares por kiloparsec; esto significa que a una distancia de 2,5 kiloparsecs la intensidad es atenuada cien veces. Por lo tanto, si queremos observar toda la Galaxia debemos excluir, debido a esta opacidad, las longitudes de onda de hasta 50 o 60 micrones.

MOROZ: Si mira la fórmula (ecuación 39) escrita por Oliver, verá que incluye el factor g, que en el caso general es proporcional al cuadrado de la frecuencia. Si aceptamos ambas fórmulas sin discusión, la primera no hay duda de que es correcta, pero yo tengo mis dudas en relación con la segunda.

Aunque sea imposible operar desde la Tierra en el intervalo submilimétrico, dentro de treinta o cuarenta años ya no será así. Creo que el intervalo de las decenas a las centenas de micrones es una parte del espectro muy prometedora para el trabajo CETI. Podemos conseguir mucha mayor direccionalidad.

En cuanto a la temperatura de fondo mencionada por Kardashev, creo que la idea predominante es que en algunas direcciones el fondo puede ser del orden de 100° K. Hay nubes de polvo, pero en otras direcciones posiblemente no; puede haber direcciones en las que el fondo sea sólo de unas decenas de grados.

A propósito, en el centro de la Galaxia hay una fuente extensa de emisión máxima en la región de los 100 micrones. ¿Podría tratarse de un diálogo entre dos ETI?

CONTENIDO DEL MENSAJE

PANOVKIN: El problema central de CETI es, en mi opinión, el de la posibilidad de establecer contacto con una inteligencia extraterrestre. Hay tres condiciones para este problema. Está primero la cuestión de la energía, que se ha discutido aquí con cierto detalle. La segunda condición expresa es la variedad estructural necesaria para transmitir información; es decir que ha de haber un enlace con información estructural. Denominaré a esto el aspecto puramente estructural del problema. También este aspecto se ha tratado en varias discusiones sobre la codificación y recodificación óptima de señales, la información redundante y otros problemas similares.

Sin embargo hay una tercera condición expresa para CETI. Es la posibilidad de transmitir información semántica substancial: la posibilidad de entender al propio corresponsal, de entender lo que él pretende. Por lo que he podido comprobar, este tercer problema no ha recibido una atención adecuada dentro del marco de CETI. Pero constituye, repito, una de las tres condiciones expresas para la comunicación.

Dos corresponsales quieren discutir cierta materia temática: el contenido objetivo de la comunicación. ¿Cuáles son las operaciones que ha de realizar cada corresponsal para establecer una comunicación con sentido? Primero de todo, el corresponsal transmisor ha de reflejar en su mente el objeto sobre el cual quiere comunicarse. Una vez reflejado en su mente, este objeto ha de codificarse para ser transmitido. Se ha de codificar en un sistema de símbolos, y eso requiere una segunda operación de igual importancia, una operación que denominaré designación: es decir, hay que traducir el contenido real a un conjunto de símbolos, codificar. Todo está ya a punto para la transmisión real. Esta operación consta también, semánticamente hablando, de dos fases: la energía y el conjunto de símbolos usados que se transmiten de modo real.

El otro corresponsal recibe esta estructura y primeramente debe decodificarla. Tiene que decodificar los símbolos que ha recibido, pero eso no es suficiente. Para comprender el significado de la comunicación ha de comparar los símbolos con el objeto, con la imagen del objeto implicado, y eso significa que el segundo corresponsal ha de efectuar también un proceso de reflexión. El objeto real se ha de reflejar en su pensamiento. Sólo entonces podrá decirse que ha tenido lugar una comunicación.

Hay que añadir, hablando en general, que cada objeto de información implica o supone otro aspecto, un aspecto pragmático: una acción real causada por una comprensión de lo que se ha comunicado. Podría decirse que representa la acción o cierto tipo de actividad mental.

En el caso CETI no hay manera de que el corresponsal receptor refleje el contenido, y, por lo tanto, tenemos únicamente un sistema de símbolos. Hablando estrictamente no podemos distinguir un sistema de símbolos de un sistema de no símbolos (como cualquier estructura material), pero eso constituye otro tema aparte. Consideremos que tenemos un sistema sobre el cual sólo sabemos que es un sistema simbólico, nada más. Tenemos con ello un ejemplo de un sistema simbólico aislado. La pregunta es: ¿podemos comprender lo que implica un sistema simbólico aislado? Por desgracia hay como mínimo tres objeciones fundamentales a tal posibilidad.

La primera es una objeción de mucho peso y del mismo tipo que el teorema mencionado por Idlis (pp. 183-184): implica que ningún sistema simbólico aislado puede interpretarse a sí mismo dentro únicamente del marco de un sistema simbólico; no puede explicar la relación entre los símbolos que lo constituyen. Eso impone un límite fundamental a todos los intentos de crear lenguajes interestelares como Lincos.

La segunda objeción fundamental, relacionada con la primera, es que tal situación hace inevitable que un sistema simbólico aislado reconstruya su propio conocimiento en el conjunto de símbolos usado. Observará un trasplante de su propio conocimiento: a su vez un sistema aislado de símbolos. En otras palabras, estamos definiendo los símbolos de este sistema simbólico no a partir de un conocimiento objetivo, sino sobre la base del conocimiento que nosotros mismos tenemos. Se trata de un problema incluso más difícil que el problema cibernético muy paralelo de distinguir el objetivo «para» y el objetivo «de» de un sistema autoorganizado.

Y, en tercer lugar, la estructura de un sistema simbólico no

se puede enlazar de ningún modo directo al sentido de la comunicación transmitida por estos símbolos. En otras palabras, una estructura o código puros no nos dan ninguna pista sobre el sentido real de lo que se está comunicando.

También es muy importante, a mi ver, el hecho de que en el proceso de una comunicación de este tipo, ambos son intérpretes, aunque intercambien los papeles en el caso de un diálogo; es decir, que cada cual ha de interpretar el conjunto de objetos que se discuten en la comunicación.

En nuestra práctica terrestre el acto siguiente reviste una importancia fundamental: la comprensión de cualquier sistema simbólico exige que los símbolos se repitan en situaciones que conocemos, pero en diferentes contextos prácticos; ésta es la única pista para decodificar su mensaje.

Muy a menudo oímos decir en la literatura CETI que si bien un sistema simbólico aislado no puede entenderse, quizá podría plantearse una situación en la que surjan contextos simples, asociados con algunos objetos físicos básicos que sean comunes a nuestro sistema y a otros sistemas extraterrestres. ¿No sería posible aprovechar eso, aprovechar el objeto real idéntico conocido de todos y de ese modo descifrar el significado de un cierto conjunto de símbolos bajo el supuesto de que éste sea el tema discutido en la comunicación?

Hablando en general, y según la teoría de la cognición, esa solución sólo sería posible si los objetos reales implicados fueran el contenido directo de nuestro conocimiento científico. Pero tengo que recordarles que esto no es cierto. Sólo podemos tomarlo en cuenta reduciendo y vulgarizando el estado real de la cuestión en el campo cognoscitivo. El hecho es que los objetos del mundo que nos envuelve no son contenidos directos de nuestro conocimiento humano, y aquí reside precisamente todo el problema. El contenido inmediato de nuestro conocimiento no consiste en las propiedades materiales o relaciones que existen en el «mismo» mundo material sin cognición, sino su reflejo en nuestras mentes por medio de imágenes ideales que son el producto directo de nuestra práctica; es decir, aquellas imágenes cuya naturaleza no está determinada por ningún fenómeno natural. Ésta es la dificultad con que nos enfrentamos: el proceso de la cognición actual mediante imágenes ideales. Tener una relación directa con la realidad implica alguna actividad práctica, y esa actividad práctica es lo único que permite al hombre entrar en contacto con la realidad. Por ese motivo las actividades prácticas constituyen una condición expresa básica para la cognición. La actividad práctica

es lo que nos pone en contacto con el mundo material y eso nos permite construir teorías científicas. No podemos separar una de la otra. Por lo tanto, las imágenes cognoscitivas que utilizamos en nuestro aprendizaje científico, la estructura de este aprendizaje, la estructura de nuestra noción en símbolos que reflejan el mundo real que nos rodea, todo eso incluye al instrumento de nuestro aprendizaje entre las propiedades objetivas de las cosas que nos rodean.

Las condiciones de la cognición son, por desgracia, inseparables de las propiedades objetivas, y, por lo tanto, sería ingenuo pensar que en función de las condiciones de nuestras teorías podremos distinguir siempre las propiedades objetivas de un fenómeno de este aspecto fundamental de la cuestión.

Todo esto me lleva a la conclusión de que para comprender el conjunto de símbolos usados por otra civilización, se ha de cumplir una condición severa: lo que se necesita es una identidad estrecha del fondo histórico de las dos sociedades. Esta identidad ha de ser tan grande que en cierta medida podamos referirnos a una segunda Tierra o a una «Tierra primordial». Creo que eso impone una limitación muy estricta sobre el número de posibles civilizaciones con las que podamos comunicar. La comunicación semántica está muy limitada en vista de estas dificultades, aunque el problema queda abierto a una discusión más profunda.*

KUZNETZOV: Me gustaría decir brevemente algo sobre el intercambio de información entre civilizaciones sin que exista cualquier entendimiento a priori sobre los métodos de codificación. Para analizar el problema es necesario definir los términos *comunicación, codificación, señal* y *modulación*.

Una comunicación transmisible es una entidad de información, un concepto sobre algún proceso o sobre una relación entre fenómenos. Una señal es una comunicación convertida en una forma conveniente para la transmisión. La codificación es un método de conversión en una señal. Modulación es un cambio en los parámetros de la emisión que hace de vehículo para la señal.

Deseamos recibir o transmitir comunicaciones, pero sólo podemos intercambiar señales. Esto presenta algunas dificultades. Si la distancia entre los corresponsales es grande, la transmisión ocupará evidentemente mucho tiempo. Si un

* Véanse opiniones diferentes en las páginas 314-315 y 324-326 y en la conversación anterior. *(Nota del editor.)*

corresponsal habla al otro sin escuchar la respuesta, la cosa resulta difícil. No existe prácticamente información a priori sobre el método de codificación y sólo podemos confiar que nuestro corresponsal sea lo bastante inteligente para comprender lo que estamos diciendo. Pero lo que se busca es precisamente ese contacto con seres inteligentes. En cuanto a los canales utilizados, evidentemente, serán variados, y esto no es una cuestión de principio.

Pasemos ahora al modo de codificación. en general el modo de comunicación entre dos civilizaciones ha de ser tal que la estrategia principal consista en avanzar la investigación. Un corresponsal trata de comprender lo que hará el otro.

Ahora bien, ¿cómo podemos transmitir nociones? Sólo puede hacerse con modelos. (No hay duda de que el modelo más completo es el mismo objeto. Contiene toda la información.) Por lo tanto, debemos transmitir modelos mediante señales. Son posibles modelos en diferentes niveles. Los modelos pueden clasificarse inmediatamente entre aquellos que retienen la mayoría de la información sobre el objeto, sobre la estructura de la comunicación, y entre otros más abstractos.

Un segundo tipo de comunicación es un lenguaje artificial del tipo Lincos. Ha de haber un aprendizaje porque no pueden transmitirse las estructuras. Como ejemplo del primer tipo supongamos que queremos transmitir un dibujo de un gato. Tenemos un conjunto de coordenadas. Podemos transmitir esta imagen en forma de señal que estará codificada en coordenadas naturales. Las coordenadas naturales en un intercambio de información se harán corresponder de modo equilibrado en los extremos transmisor y receptor sólo para tener prueba de la señal. Convendrá usar, por ejemplo, los parámetros sobre los cuales se lleva a cabo la búsqueda de la señal. Por ejemplo, todos los corresponsales explorarán las frecuencias. Una coordenada geométrica utilizable es el tiempo; otra es la frecuencia. Eso significa que hay dos búsquedas, las cuales proporcionan una imagen bidimensional del gato (figura 41).

De este modo podemos transmitir una señal de información sin utilizar ni siquiera señales especiales de llamada. Si repetimos esta imagen muchas veces, en cualquier frecuencia, tendremos una comunicación recurrente. Si la búsqueda se lleva a cabo en un intervalo estrecho de frecuencia, la imagen se transmitirá repetidamente, en estos momentos habrá impulsos y al repetirse una y otra vez las imágenes obtendremos un sistema recurrente de impulsos que se convertirán luego en una señal para atraer la atención.

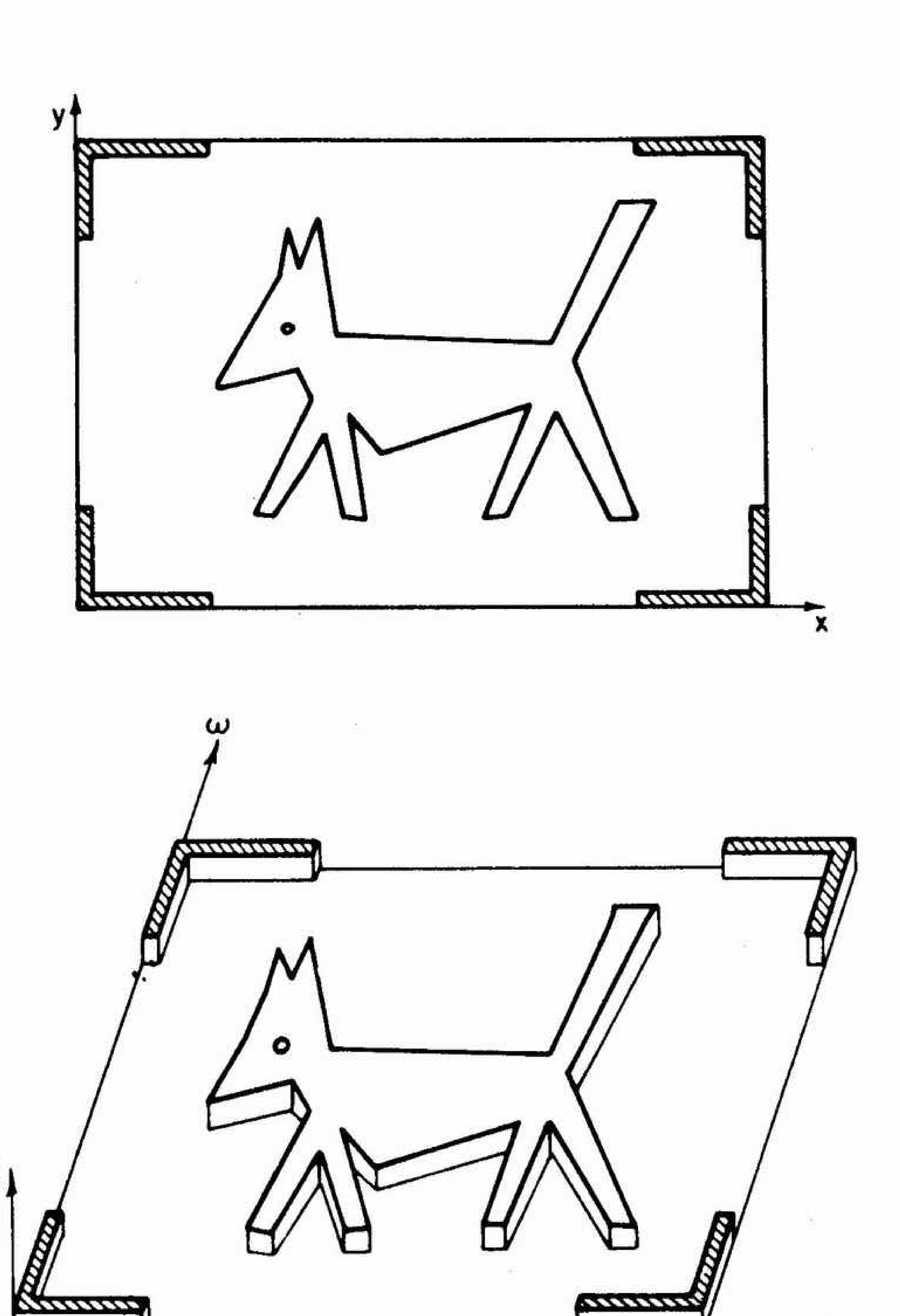


FIG. 41. Transmisión de la imagen de un gato, utilizando como coordenadas la intensidad, la frecuencia y el tiempo.

El instrumental para recibir la señal llevará a cabo simultáneamente la búsqueda y el análisis, y puesto que resultará suficientemente comprensiva, recibirá un gran número de parámetros que pueden usarse para la actividad radioastronómica normal. Puesto que la búsqueda continuada de ETI ha de tener en cuenta un gran número de parámetros, también resultará adecuada para las tareas radioastronómicas.

El problema CETI tiene muchas facetas. Aquí se han reunido personas de varias ramas de la ciencia. Ha de haber una buena coordinación para elaborar los diversos aspectos del problema. Tenemos que realizar una distribución racional del esfuerzo.

PETROVICH: En relación con la primera parte de su declaración, ¿cree posible transmitir ideas individuales?

KUZNETZOV: Sí: por medio del modelo resulta conveniente transmitir imágenes: imágenes que corresponderán a ciertas ideas.

PETROVICH: Por lo tanto, hay un sistema; ¿uno sólo puede comprender una idea en un conjunto de ideas?

KUZNETZOV: Sí. Evidentemente es esencial un cierto grado de aprendizaje.

BRAUDE: Usted transmite una imagen, pero esa misma imagen será recibida en otro mundo e interpretada de cierto modo. ¿No cree que en otro mundo, con seres con un índice de refracción diferente, las imágenes pueden quedar distorsionadas y el gato no parecerse en nada al gato, porque el medio es diferente?

KUZNETZOV: La imagen quedaría deformada; se recibirían gatos deformados. Pero la estructura topológica de la imagen es la misma.

SUKHOTIN: Me gustaría comentar los problemas de decodificación y concretamente la manera de distinguir una señal artificial de otra natural. La importancia de los métodos de decodificación para los problemas CETI es evidente. El profesor Freudenthal propuso un programa de enseñanza (Lincos) que reduce el papel de estos métodos a un mínimo. Sin embar-

go, incluso un mensaje Lincos no se presta fácilmente a la decodificación si se recibe sin un texto de instrucciones. Por otra parte se afirma a veces que es imposible comprender mensajes de ETI. La afirmación es evidentemente cierta para un mensaje demasiado breve en relación al alfabeto o deliberadamente confuso.

Hay dos aspectos del problema de la decodificación: distinguir una señal artificial de una natural e interpretarla en el caso de que sea artificial. Empecemos con la segunda cuestión. La decodificación no es un problema único. Puede dividirse en muchos problemas particulares que son en sí complicados.

Los problemas de decodificación se agrupan en tres clases, tres estadios de decodificación. Me abstendré aquí de discutir la decodificación de mensajes pictóricos. Me limitaré a lenguajes de tipo humano.

En este caso los tres estadios son el análisis gramatical, el análisis semántico y la traducción. En el primer estadio se han de resolver problemas como el de los morfemas identificantes (es decir, las menores unidades lingüísticas significativas), la separación de palabras y el establecimiento de la estructura de las palabras: o sea, revelar las relaciones entre morfemas, descubrir la clasificación sintáctica de palabras, establecer las fronteras entre frases, etc.

El segundo estadio exige establecer los equivalentes semánticos de palabras y expresiones, distinguir situaciones elementales y establecer la estructura del texto; en otras palabras, revelar las relaciones en el conjunto de situaciones elementales.

El tercer estadio consiste en proyectar el lenguaje del mensaje en el lenguaje del investigador. Esta proyección es un equivalente formal de la traducción.

Si uno trata con lenguaje humano hay un cuarto estadio de la decodificación que consiste en la reconstrucción de la pronunciación.

El instrumento principal de la decodificación lingüística es el algoritmo decodificador. Al decir algoritmo decodificador me refiero a un sistema de tres objetos: primero, el conjunto de interpretaciones admisibles (soluciones); segundo, la función de calidad, que estima cada una de las interpretaciones admisibles: esta función se calcula a partir del texto considerado; y finalmente el tercer objeto es el proceso de la computadora o el algoritmo adecuado para encontrar el máximo o el mínimo de la función de calidad. Tenemos algoritmos comprobados experimentalmente en computadoras para algunos problemas sencillos, incluyendo algunos experimentos que no se han

citado en el volumen editado por Kaplan.* Voy a dar un ejemplo de un algoritmo sencillo que permite tocar el primer problema, o sea, distinguir un mensaje artificial de otro natural.

Este algoritmo resuelve el problema más sencillo de clasificación: la clasificación de un alfabeto de unidades lingüísticas en dos clases. Si el alfabeto es una lista corriente de letras, el algoritmo determina simplemente qué letra es una vocal y cuál una consonante. El conjunto de soluciones admisibles en este caso corresponde a un número de divisiones del alfabeto en dos subconjuntos que no se cortan. La calidad de la división está determinada por la siguiente hipótesis: en cualquier texto en un lenguaje natural las secuencias vocal + consonante (VC) o consonante + vocal (CV) son más frecuentes que las secuencias VV y CC. El número de secuencias VC y CV (para un texto dado) depende exclusivamente de la división. De este modo aquel número puede servir como una estimación de la calidad de la división.

Este algoritmo se ha puesto a prueba repetidamente y ha dado buenos resultados. Hay un proceso de cálculo que define el máximo de esta función.

Ahora podemos pasar a la manera de distinguir una señal artificial de otra natural. Considero que un mensaje enviado por ETI está destinado en cierto modo a la decodificación. ¿Qué significa esto desde el punto de vista de los métodos de decodificación? Significa que al analizar ese o aquel fenómeno lingüístico, al resolver ese o aquel problema de decodificación, ha de destacar una solución correcta sobre el fondo de soluciones inadmisibles. Eso significa a su vez que en el conjunto de soluciones admisibles no sólo ha de haber soluciones muy buenas, sino también muy malas, y el grado de inteligibilidad de un mensaje puede estar determinado por la diferencia entre la calidad de las soluciones mejor y peor; la mayor diferencia corresponderá al mayor grado de inteligibilidad.

Un fenómeno lingüístico para el cual esta diferencia es grande puede denominarse diagnóstico. Si uno quiere procesar una secuencia al azar de letras mediante el algoritmo separador de vocales y consonantes y quiere determinar la estimación, es evidente que la estimación se aproximará a cero. La situación será la misma con un texto estrictamente periódico donde las vocales siguen estrictamente a las consonantes. En este tipo de texto (al azar y estrictamente periódico) las vocales y las

* B. V. SUKHOTIN en la obra editada bajo la dirección de S. A. Kaplan *Civilizaciones extraterrestres: Problemas de la Comunicación interestelar* (en ruso), Moscú, 1969.

consonantes no constituyen diagnóstico. Tales textos no están destinados a ser descifrados. Podemos suponer que en un texto destinado a ser descifrado, por lo menos algunos fenómenos lingüísticos serán diagnósticos. Por otra parte, el profesor Braude ha sugerido que la estimación propuesta es similar a la relación señal-ruido que se utiliza tan ampliamente. De este modo si investigamos un mensaje con la ayuda de un determinado algoritmo de desciframiento, no sólo conseguiremos alguna interpretación sino que podremos estimar también la validez de nuestro análisis; cuanto más favorables resulten tales intentos, mayores serán las probabilidades de que nos enfrentemos con un mensaje inteligente. Es importante tener en cuenta que este resultado puede obtenerse sin entrar en análisis semánticos intrincados, mediante el análisis gramatical más sencillo.

PETROVICH: Usted habla de inteligibilidad. ¿Tiene el mismo sentido que se utiliza en CETI esta predictibilidad de las regularidades con que aparecen los símbolos?

SUKHOTIN: Empecé mi intervención sin hablar terminológicamente de la inteligibilidad. Sin embargo, traté de definir después esta noción. Creo que un mensaje destinado a ser descifrado puede comprenderse, mientras que un mensaje que no está destinado a ser descifrado evidentemente no puede serlo.

PETROVICH: ¿Podría estimar el tiempo necesario para aprender Lincos, teniendo en cuenta el gran número de ejercicios que han de hacer los estudiantes?

SUKHOTIN: Tenga en cuenta que estoy estudiando métodos para que el programa de instrucción sea innecesario. No creo que recibamos un mensaje del tipo Lincos.

OLIVER: Me imagino que no hablarán a base de vocales y consonantes. Creo que van a hablar con clics binarios.

SUKHOTIN: Tampoco yo creo que utilicen vocales y consonantes. Mencioné el problema de descubrir vocales y consonantes por dos motivos: primero, es un buen ejemplo de un algoritmo simple de decodificación del tipo clasificatorio; segundo, por medio de este algoritmo introduje la importante idea de la inteligibilidad.

TOWNES: Me pregunto si alguien estaría dispuesto a comentar la posibilidad de que nos enviaran un cohete espacial con un diccionario completo basado en pictogramas, y luego gran cantidad de literatura dentro. Si se supone que el viaje puede durar grandes períodos de tiempo, me parece que sería un modo bastante eficiente de comunicación, que elimina completamente gran parte de las incertidumbres que estamos discutiendo.

MORRISON: Esta sugerencia concreta fue estudiada por el doctor Bracewell, el cual hace tiempo discutió en un artículo la cuestión de los envíos de vehículos. Este verano ha preparado un segundo artículo en el que sus consideraciones desembocan en la conclusión de que el método no es eficiente cuando el número de canales posibles es muy grande o muy pequeño; pero existe un intervalo intermedio en el que por lo menos sus estudios parecen indicar que los vehículos son el método mejor. Creo que muy probablemente deberíamos tomar nota de ello y discutirlo después.

MINSKY: Me pregunto si muchos de ustedes han leído la novela de Hoyle *A for Andromeda*. La idea es que en lugar de enviar un mensaje educativo muy difícil de codificar como el que describe Freudenthal y en lugar de enviar la imagen de un gato, hay una zona en la que podemos enviar el mismo gato. El doctor Kuznetzov dijo que hay una propiedad que es independiente de la distorsión, a saber, la topología. La topología es lo que queda después de la distorsión.

En resumen, la idea es que podemos transmitir computadoras. Una computadora es un apartado topológico absoluto y si enviamos imágenes –y prefiero la propuesta de Drake en favor de una televisión en el formato de números primos en lugar de esta forma de televisión en modulación de frecuencia–, podemos enviar una serie de imágenes de Drake que explicarán cómo construir un programa, o más bien una computadora con su programa. Luego nuestros ETI pueden poner en marcha esa computadora, que contendrá el programa de enseñanza de Freudenthal, pero de una forma que permita interaccionar con la gente y aprender su lenguaje. Se pueden transmitir computadoras sin temor a ninguna interpretación ambigua. Creo que si se envían diagramas lógicos de Boole se evitan la mayor parte de las posibles ambigüedades.

Me gustaría convencerlos de la posibilidad de elaborar un programa de computadora que pueda interaccionar de modo

útil con el lenguaje de otros. Voy a leerles unas cuantas frases de interacción hombre-máquina sacadas de un nuevo programa de computadora completado hace un año por Terry Winograd en una tesis doctoral en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Este programa se refiere a un pequeño mundo mecánico en el que sólo hay unos pocos conceptos: el concepto de un cuerpo sólido, la idea de que un cuerpo sostiene a otro, la idea de que algo puede estar en una caja, de que algo puede estar a la derecha o a la izquierda: coordenadas cartesianas y cosas así. El programa y una persona están discutiendo este mundo mecánico y la persona pregunta en inglés, escribiendo a máquina: «¿Qué contiene la caja?»

La máquina contesta: «La pirámide azul y la caja azul.» Éste es un mundo de juguetes infantiles. «¿Cuántos bloques no están en la caja?» «Cuatro», contesta la máquina. «¿Es por lo menos uno de ellos más estrecho que el bloque que te hice coger?» «Sí, el cubo rojo.» El diálogo sigue por estos cauces. Llega un momento en que el operador dice: «¿Hay una torre?» La máquina contesta: «Lo siento, pero no conozco la palabra "torre".» El hombre le explica: «Una torre es un montón formado, por ejemplo, con dos cubos verdes y una pirámide.» «Ya entiendo», contesta la máquina. «Construye una», le pide el hombre, y la máquina lo hace. Alarga su mano mecánica, mueve los cubos y construye la estructura que acaban de describirle. En otra parte del diálogo, uno pregunta a la máquina: «¿Cuándo cogiste la pirámide?» La máquina contesta: «Cuando amontonaba el cubo rojo, el gran bloque rojo y el gran cubo verde.» «¿Por qué lo hiciste?» «Para dejar suelto el cubo rojo.» El hombre pregunta: «¿Por qué dejaste suelto ese cubo?» La máquina contesta: «Para ponerlo sobre el cubo grande verde.»

Lo interesante es que esta máquina no sólo acepta instrucciones en inglés, su lengua natural, sino que puede pedírsele que explique por qué obedeció a las instrucciones, y dará una jerarquía de razones mecánicas hasta que, al final, si no hay más razones, deberá contestar: «Porque me dijiste que lo hiciera.»

Parece, pues, que en 1970 superamos un umbral que nos permitió tratar semánticamente con las computadoras. En los próximos diez, o cincuenta, o cien años tengo plena confianza en que podremos escribir programas de computadora que serán razonablemente inteligentes. Entonces la mayor parte de los problemas de decodificación con que Freudenthal se enfrentó, en mi opinión sin un éxito total, empezarán a desaparecer.

SAGAN: Si construimos una computadora siguiendo las instrucciones de una comunicación de radio ETI, ¿habremos establecido un canal de comunicaciones con una velocidad mayor de bits que si nos hubiésemos limitado a nuestros propios aparatos (por así decirlo)? Sin embargo en la historia citada por el doctor Minsky las intenciones de las ETI que transmitían instrucciones de computadora no eran totalmente benevolentes. Como ha recalcado Morrison, sólo construiríamos un aparato así tras haberlo comprendido totalmente.

CRICK: ¿Puedo preguntar al doctor Minsky la longitud del programa a que se ha referido?

MINSKY: El programa de Winograd es muy grande, de unos 10^6 bits. No hay manera de calcular la reducción que podría experimentar. Puede imaginarse que bastarían 10^4 o 10^5 bits.

Me gustaría, sin embargo, añadir un comentario. El núcleo esencial de esta propuesta es que si bien resulta difícil transmitir unos conceptos aislados, los conceptos sobre procesos, y especialmente los conceptos sobre procesos digitales, son muy fáciles de transmitir: porque a medida que se han interpretado correctamente los primeros símbolos, las ETI pueden simular y hacer funcionar esta computadora de un modo más o menos inmediato. No requiere más conceptos, porque las ETI lo están construyendo esencialmente para sí mismas, y experimentan con él para ver qué puede hacer. En la situación de Freudenthal uno ha de hablarles de un concepto matemático y luego decirles más y más cosas sobre lo mismo; tengo la impresión de que el proceso no se acaba nunca.

KUZNETZOV: Me gustaría preguntar esto al doctor Minsky. Quedé algo desconcertado con su referencia al gato. No hay duda de que un gato vivo es preferible a una imagen de un gato, pero la cuestión consiste en cómo transmitir este sistema en desarrollo de un gato vivo. Por lo tanto, el mismo problema ha quedado trasladado simplemente a otra parte, aunque la idea es muy buena.

SAGAN: Se transmite el código genético del gato.

KUZNETZOV: Esa idea es también muy buena, pero ¿cómo va a hacerlo?

BRAUDE: Me gustaría preguntar al doctor Minsky si tuvo en cuenta en estos programas la posibilidad de que la transmisión de señales pase por un medio dispersivo que no conserve la topología.

MINSKY: No, enviamos simplemente la secuencia de pulsos. Pero no hay ningún medio dispersivo que pueda cambiar el orden de recepción de los pulsos, aunque la dispersión puede extenderlos tanto que resulte muy difícil su conservación.

OLIVER: Creo que la sugerencia del doctor Minsky es fascinante. Plantea en mi mente una interesante cuestión. ¿La capacidad transmisora de información de una computadora descrita mediante la transmisión por un canal es mayor que la información necesaria para describir la computadora? En ese caso parece que hemos violado el límite de Shannon.

MINSKY: No, la información es la misma. Lo importante es el carácter de lo que transmitimos. Yo afirmo que la mayor parte de la información que tiene la gente y que es importante, no son hechos sino procesos. En particular, el proceso mediante el cual uno analiza un lenguaje y comprende una gramática es más importante que la misma gramática. El motivo por el cual el programa de Winograd tiene más éxito que cualquier programa anterior para tratar la estructura del lenguaje es que en el programa de Winograd la estructura del lenguaje se describe como un proceso, es decir, el proceso mediante el cual uno decodifica el lenguaje, y no los métodos tradicionales de Chomsky y de otros, en los que uno intenta describir la estructura del lenguaje como una secuencia de reglas aisladas. Creo que Shannon estaría de acuerdo en que uno saca mucho más partido de su bit si es un bit profundo de conocimiento que si transmite un bit trivial.

LAS CONSECUENCIAS DEL CONTACTO

MORRISON: Podría poner de subtítulo a mi charla: «El arte de la profecía.» Lo mejor que puedo decir de ese arte es que se ha perdido ya, suponiendo que haya existido alguna vez. A nosotros no se nos ha dotado de una visión tan compleja. Hemos organizado este debate sobre las implicaciones sociales del contacto con una inteligencia extraterrestre, no porque confiemos en decir nada muy penetrante sobre el tema, sino porque desde el principio necesitamos aceptar la responsabilidad por los efectos de lo que podamos planear. Estoy aquí más como un signo de esta responsabilidad que como una contribución a la profecía.

Para discutir los efectos imaginables del contacto, creo que he de dar algunos modelos sobre lo que sucede cuando se detecta una ETI. Creo que recibiremos una señal con la estructura que aparece en la figura 42, primero en un canal, y con el paso del tiempo en un número cada vez mayor de canales. El tiempo crece hacia la derecha. De momento no doy escala. La señal se divide en muchas partes según la siguiente estructura temporal: cada letra mayúscula indicará una porción idéntica: A idéntica a A, B a B, etc. Entre los bloques A se repite con menor frecuencia otro conjunto de porciones idénticas B, distintas desde luego de A. Luego viene otra estructura repetida, C, quizá con una repetición no tan rápida. La figura muestra cierta estimación del tiempo en el canal, tiempos pequeños para A, tiempos mayores para B, tiempos más grandes todavía para C. Puede haber todavía más estructuras, pero tras una pequeña lista A, B, C, ... todas las demás partes tendrán señales completamente no repetitivas. Quien origina la señal intentará mantener el interés por ella dando su parte más sencilla en una secuencia que se repita muy rápidamente; a esto le llamo la señal de adquisición A.

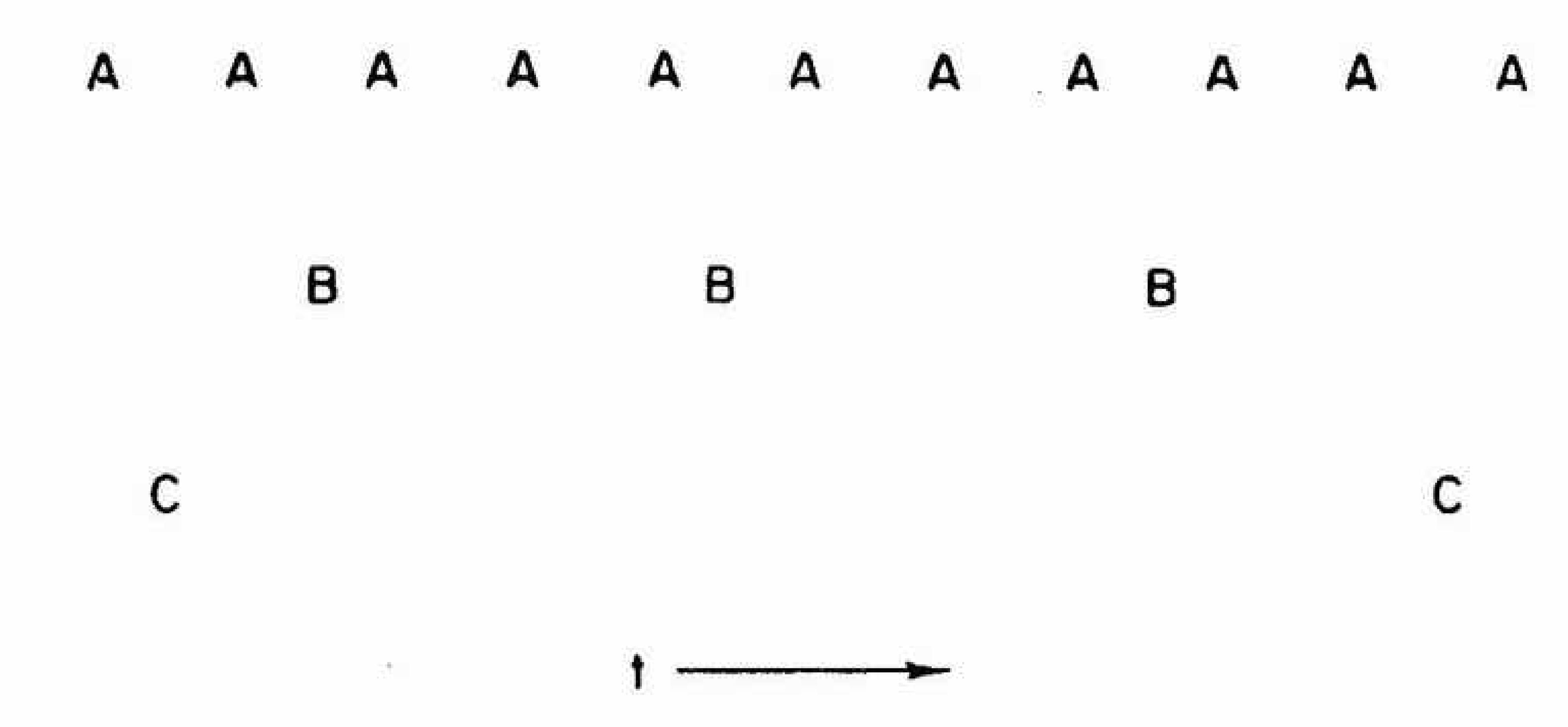


Fig. 42. Representación esquemática de la estructura de las señales que se espera recibir de una civilización extraterrestre. Se transmite con frecuencia una señal de adquisición A, que es fácilmente reconocible. Se transmiten con menor frecuencia partes del mensaje B, C... más largas y más difíciles.

Hay muchas emisoras de radio en las que se emite cada hora una señal de tiempo o las letras principales de llamada. Podemos imaginar perfectamente –en una escala temporal que no puedo conjeturar fácilmente aquí, en una escala temporal sin concretar, pero no más larga de 10^6 segundos– estas señales breves, simples, probablemente de banda ancha e intensidad elevada, destinadas a llamar la atención sobre la existencia de un mensaje. Como he tratado de indicar antes, tenemos que distinguir claramente una señal de adquisición de un mensaje eficiente.

Imagino en medio una señal B, mucho más compleja que A, pero menos compleja que el mensaje definitivo, que es de hecho una señal decodificadora. Me gustaría tener tiempo para entrar en la discusión del doctor Panovkin (p. 302), pero en mi opinión la misma señal, por su naturaleza física, por su intención y por otros rasgos comunes a las civilizaciones del transmisor y del receptor, puede ser el rodeo que salve las dificultades lógicas de que hablaba Panovkin.

Con esta suposición, imagino una tercera estructura, C, en la señal jerárquica, que es esencialmente una lección de lenguaje. Aquí estoy totalmente de acuerdo en que la decodificación es una proyección de los símbolos en algunos referentes. La lección de lenguaje ha de incluir una armadura más fuerte de contexto, y el resto del tiempo estará ocupado por una estructura muy compleja, que explotará probablemente la amplitud de banda y una modulación ingeniosa; todo el conjunto ocupará un canal –quién sabe de qué amplitud–, pero que en mi

opinión no superará una amplitud de banda de 100 megaciclos. Se trata de una banda muy ancha.

Esta estructura compleja llega ahora a nuestro receptor. Se convierte durante un largo período de tiempo en el objeto de un estudio intenso socialmente exigido. Lo considero más bien como la empresa de la historia o de la ciencia que como la empresa de leer un mensaje corriente. Es evidente que se presentará un gran problema de almacenamiento, las cintas se irán amontonando una sobre otra y, como suele suceder, los datos superarán en mucho nuestra capacidad de lectura. El ritmo de los datos superará durante mucho tiempo nuestra capacidad de interpretación.

Por eso pensé que sería útil estudiar la escala de esta señal. ¿Puede una señal de este tipo acercarse cuantitativamente a una parte grande de la experiencia humana? Desde luego que resulta peligroso juzgar tales acontecimientos, pero llegué a la conclusión de que no constituirá una adición cuantitativa importante a la experiencia humana. He estimado que la experiencia humana (y me gustaría mucho discutir estas estimaciones con otras personas) es de 10^{20} a 10^{23} bits (no crean que reivindico una tal precisión; me he dado tres órdenes de magnitud, pero eso representa sólo la parte media de la conjetura), pero creo que se dan cuenta de que estamos hablando de órdenes de magnitud por logaritmos. Quizá la experiencia humana, la experiencia humana total, sume un mol de bits.

La mayor parte de la experiencia humana permanece inexpresada. Es el contenido conjunto de la mente consciente e inconsciente de todos los humanos. Se traduce en experiencia pública mediante la conducta de los seres humanos, del uno con el otro –mediante la conversación, la escritura, el trabajo del artesano, la elaboración del pan, lo que sea– y creo que se pierde una gran parte en la transferencia, con lo que el número puede bajar a 10^{16} o 10^{18}. El ritmo actual de la experiencia humana se aproxima a 10^{11} bits por segundo, o 10^{18} bits por año.

Todos sabemos que cuando utilizamos números grandes en un contexto poco familiar, hay que introducir alguna unidad razonable. Sugiero como guía para la discusión que utilicemos todo lo que sabemos de la cultura helénica. Nadie puede negar la importancia que este tema ha tenido durante dos o tres milenios para el mundo entero. Corresponde a un mensaie de sentido único con 10^9 bits de texto.

No es honrado referirse sólo al texto; el contexto es muy importante. Hago una estimación muy cruda del número de

volúmenes de fotografías, etc., necesarios para describir la arquitectura, el clima, la cerámica, los peces, la botánica, etc.: todo lo que pueda darnos el contexto de la época helénica. Creo que no es mucho más de 10^{11} o 10^{12} bits.

Ven, pues, que podemos aprender mucho y experimentar un efecto importante en la formación de nuestra mente e instituciones, tanto individuales como sociales, con un número de bits que es mucho menor que la experiencia total humana, por un factor de 10^{10} o 10^{12}. Un canal de 10^{18} bits por segundo, una estimación grande, o incluso un centenar de tales canales al cabo de un año sería mucho más que el total de la cultura griega, pero continuaría siendo pequeño en cantidad comparado con nuestra experiencia humana. Me parece que se precisarían diez años a este ritmo, más o menos, para que un canal rápido sumara lo que los humanos ya tenemos: y como es lógico en diez años habríamos generado una cantidad igual de más. Esta cruda discusión cuantitativa nos dice muy poco de este universo maravillosamente complejo, mas para mí deja sentado que lo importante es la calidad de lo que llegue y no su cantidad. No hay duda de que la misma señal de adquisición es el paso más importante de todos. Es totalmente posible que la estrategia de recepción adecuada implique la búsqueda de estas señales de adquisición de un modo diferente al de un canal de mensajes. Confío que está clara mi idea de que no podemos prever la lectura de algún mensaje telegráfico sencillo, como un periódico.

El reconocimiento de la señal es el gran acontecimiento, pero la interpretación de la señal será una tarea social comparable a una disciplina muy amplia, o rama del conocimiento. Creo, pues, que un estudio sobrio nos demostrará que un canal de mensajes no nos dejará expuestos al tipo de impacto que hemos visto a menudo en la historia cuando se inicia el contacto entre dos sociedades de niveles de avance muy diferentes. Como es lógico, estará ausente a través del espacio *cualquier* dominancia militar, no sucederá ni lo de México en el siglo XVI, cuando el dominio militar del exterior dependió de una alianza local, ni lo de las islas Canarias o el Perú, donde fue totalmente exterior. Ni existirá tampoco el empuje de una competencia técnica y económica, como la que provocó el hambre entre los tejedores manuales altamente desarrollados de Bengala al enfrentarse con las telas de Manchester fabricadas a máquina. Nos exponemos como máximo a los peligros u oportunidades con que se enfrentó la sociedad japonesa en dos ocasiones de su historia, primero cuando se encontró con la cultura enormemente fuerte de los Tang, a través de los viajes de unas contadas personas; o en el siglo XIX cuando el sistema japonés cambió enteramente tras una simple amenaza de invasión que sacó a la superficie tensiones internas muy hondas de la sociedad japonesa. Confío, pues, que en este tipo de modelo, que me parece muy plausible, imaginamos que la señal tendrá un gran impacto, pero mediado de modo lento y sobrio, transmitido a través de todos estos aparatos filtradores de los eruditos que han de interpretar y publicar un libro, etc. Fíjense en que las glosas totales sobre el pensamiento griego son por lo menos tan voluminosas como los mismos textos griegos.

Si consideramos que la adquisición bilateral es muy rara, la comunicación se establece necesariamente entre sociedades, no entre personas. Creo que la analogía griega tiene también aquí mucho valor. El contenido de la señal sólo responderá en parte a nuestros interrogantes, incluso a los de las ciencias naturales, a causa de las limitaciones planteadas por contextos inciertos y materiales diferentes. No iniciará una Edad de Oro en la que el significado de alguna comunicación sobre nuevos tipos de partículas elementales sea inmediatamente obvio. Los físicos tendrán que decidirse entre estudiar este conjunto de conocimientos, que incluirá de modo seguro la respuesta, o hacer el experimento por sí mismos. (Este punto se ha alcanzado ya de muchas maneras en nuestra propia literatura científica.) La capacidad de las ETI me merece una alta opinión, pero me gustaría también creer que todas las antiguas cuestiones filosóficas y teológicas van a quedar decididas de repente y a satisfacción general en los primeros mensajes: sin embargo, la experiencia me hace pensar que no será así.

Los que desean entender el mensaje considerarán la cuestión resuelta; los que quieran rechazar el mensaje, lo rechazarán, puesto que su garantía de veracidad no es en sí superior a la de cualquier otro texto.

La mayor parte de esta señal muy compleja no contendrá principalmente ciencia y matemáticas sino más bien lo que nosotros denominaríamos arte e historia. Para mí está claro por motivos combinatorios que nuestra sociedad o cualquier sociedad duradera resolverá muchos problemas científicos y matemáticos más fácilmente por sí misma que estudiando las cintas grabadas de fuentes extraterrestres. Pero no estamos en absoluto en disposición de reconstruir los acontecimientos imaginativos, ficticios o históricos de un futuro lejano. Las posibilidades son demasiado grandes. No tenemos pistas sobre cómo hacerlo. Hay muchos más cuentos populares que leyes de

mecánica. Creo que esto dará el motivo fundamental, duradero, para un canal de este tipo. Nos ofrecerá estas novedades como una obligación social experimentada por los transmisores, que por su parte recibieron ya en el pasado muchas novedades así.

Me imagino que la razón más importante para la búsqueda de un canal así, es que si existe –y no hay duda de que ésta es la cuestión más importante desde nuestra situación actual– producirá una concepción del universo menos alienante que la que caracteriza actualmente a la población general de las sociedades industriales. Y no me refiero ahora a una ayuda práctica, que desde luego existiría, pero que es probablemente más difícil y a largo plazo menos importante.

Incluso si adoptamos un modelo de señal que sea bastante optimista, resulta que la señal no llegará nunca a dominar cuantitativamente toda la experiencia humana; sin embargo, constituirá una aportación muy rica –igual a la de la cultura griega en un año de canal–, una aportación que no puede estudiarse como se lee un periódico, como tampoco puede hacerse esto con la vida y pensamiento de Atenas, sino únicamente mediante una investigación cuidadosa con todo el equipo de erudición humana cooperando a lo largo de un prolongado período de tiempo: una disciplina y no un titular o un oráculo.

PLATT: Me parece que Morrison está diciendo que el medio es el mensaje.

SHKLOVSKY: ¿Se trata de un chiste?

PLATT: No, no es un chiste.

SHKLOVSKY: ¿Podría explicar la frase?

PLATT: El medio es la televisión. Trae el mensaje de que existen emisoras de televisión.

MORRISON: La existencia de la señal es, desde luego, la propiedad más importante.

LEE: ¿Cree usted que la señal contendrá alguna pregunta?

MORRISON: Sí. Creo que la señal contendrá muchas preguntas. Contendrá, como es lógico, propuestas para la construcción de transmisores mucho mejores, pero la escala temporal será muy lenta. Me imagino que la distancia característica al transmisor es de decenas o centenares de años-luz; por lo tanto no esperan una respuesta antes de decenas o centenares de años.

LEE: ¿Puede darnos una estimación del tiempo necesario para transmitir el mensaje principal?

MORRISON: Creo que el mensaje principal tiene una longitud efectiva infinita, es decir que durará todo el tiempo L, sea cual fuere. Continuarán enviándonos constantemente lo que saben, o mejor piezas cuidadosamente seleccionadas de lo que saben. ¿Qué haría usted?

LEE: ¿Significa eso que los sintonizaremos en algún momento arbitrario?

MORRISON: Desde luego; lo que uno obtiene es un mensaje jerárquico, como al ir a la escuela. Al final uno aprende lo suficiente para leer la última *Physical Review* cuyo nuevo material continúa llegando de vez en cuando.

DRAKE: Me parece poco honrado utilizar únicamente el número de bits como medida, incluso en el caso de la civilización griega. Mi primera protesta es que la velocidad en bits de la civilización humana se refiere a bits que son casi totalmente opcionales y no tienen ninguna significación duradera, es decir, que algunos bits son mejores que otros. Por ejemplo, quizá con sólo 10 000 llegaría el diseño de un telescopio de taquiones que tendría un impacto mucho mayor para la civilización que todos los bits de Grecia.

MORRISON: Estoy en franco desacuerdo con esta implicación. Los diez mil bits equivalen a 2 000 palabras. Para dar en *The Physical Review* con un artículo que sea tan bueno y tan breve, uno tendrá que esperar cien años.

DRAKE: Quizá los telescopios de taquiones sean más fáciles de construir de lo que imagina.

MORRISON: Sí, serían muy útiles si existieran.

PANOVKIN: Estoy en desacuerdo con el punto de vista de que las matemáticas son universales. ¿Cuáles son las fuentes

de la matemática, las bases de la matemática? Puede haber diferentes bases axiomáticas para la matemática. Fenómenos como la infinidad son generalizaciones del conocimiento humano. Otras sociedades pueden tener otras generalizaciones.

BRAUDE: ¿Piensa usted que parte de la información contenida en los mensajes tendrá significados fuera del alcance de la experiencia humana?

MORRISON: Seguro que sí. El número de bits no tiene nada que ver con ello: se trata sólo de un número. No tiene nada que ver con el contenido. El mensaje puede ser muy rico; sólo digo que si supera en mucho a nuestra propia experiencia resultará difícil de comprender.

Permítanme que conteste únicamente a Drake, y quizá contestaré así a su pregunta. Galileo vio el telescopio cuando llegó por primera vez a Venecia en 1608. En el año en que hizo su primer telescopio, los vendían como novedades por las calles de París y de Amsterdam. Tenían un aumento de tres veces. Cuando uno miraba a través, veía un lío informe. Eran simples juguetes. Galileo construyó centenares de lentes durante su vida. Con cuatro que seleccionó cuidadosamente descubrió las lunas de Júpiter e inició la ciencia telescópica. Tuvo que desarrollar la fabricación de lentes, no copiar las malas lentes.

DRAKE: Me parece que está de acuerdo conmigo, pero permítame otro ejemplo. ¿Cuántos bits se necesitan para transmitir $E = mc^2$?

MORRISON: Supongamos que en 1600 usted está estudiando las series de Fibonacci y aparece un ángel que escribe $E = mc^2$ en su cuaderno. No puede ni preguntar qué significa aquello. ¿Le sirve de mucho? Los científicos de Europa necesitaron diez años para entender la formulación de Einstein de 1905, que estaba vinculada de modo más estrecho al contexto. Imagino que fue el documento individual de física más rico que leeremos nunca –estoy totalmente de acuerdo con esto–, pero no creo que fuera sencillo.

BURKE: Me gustaría dirigir una observación o pregunta al profesor Morrison en relación con la estimación del tiempo aproximado que se necesitaría para pasarnos un bloque razonable de –¿cuánto era?– 10^9 o 10^{10} bits. Lo que me preocupa en esta estimación es que la incertidumbre esté en el logaritmo. Si todos estos bits llegaran en una escala temporal de diez años, serían realmente muy importantes.

MORRISON: Por favor, no me interprete mal. En primer lugar, algunas de sus cifras están equivocadas. Lo que dije era que la experiencia humana no se repetiría hasta al cabo de diez mil años. Con mi estimación cruda, la cifra de la cultura griega podría alcanzarse en 100 segundos; he supuesto deliberadamente un canal muy ancho. El aprovechamiento del mensaje precisaría mucho más tiempo; los datos se acumulan mucho más rápidamente de lo que uno podría interpretarlos.

OLIVER: Estoy de acuerdo con las observaciones del profesor Morrison de que la detección de la primera señal que creo será una señal de radiofaro no provocará un *shock* cultural. Pero me gustaría señalar que una vez transcurrido el tiempo de ida y vuelta para la luz y cuando las dos culturas saben que están en contacto, no hay ninguna dificultad técnica en conseguir información al ritmo de 10^7 o 10^8 bits por segundo a 500 o 1 000 años-luz de distancia.

MORRISON: Supuse 10^9 bits por segundo para empezar; por lo tanto, mi estimación todavía supera a la suya en un factor grande.

MCNEILL: He escuchado las observaciones del doctor Morrison con un especial interés en ver si queda aliviado de algún modo el escepticismo que me merece todo el tema de la comunicación extraterrestre, y lamento informar que no ha sido así. A mí me impresiona quizá mucho más que al profesor Morrison la dificultad de descifrar el mensaje. Me parece que cualquier suposición razonable sobre la diferencia entre la vida terrestre y la vida en el planeta X, aunque el planeta X tenga un dominio técnico comparable al nuestro o superior, será tan grande que hará muy forzada la probabilidad de llegar a una inteligibilidad mutua, y no puede confiarse en ella. Nuestra inteligencia, si no me equivoco, está muy aprisionada por las palabras, es una prisionera del lenguaje, y no veo que podamos imaginar el lenguaje de otra comunidad inteligente con muchos puntos de contacto con el nuestro. Las diferencias en bioquímica, en el alcance sensorial de los seres inteligentes, en sensibilidad, en cosas como el tamaño del cuerpo y la estruc-

tura de las neuronas, me parece se suman para dar una elevada improbabilidad de inteligibilidad mutua.

Pero supongamos que todas estas dificultades resultan de hecho solubles, que uno no sólo puede recibir el mensaje sino también descifrarlo; me parece que en este caso se plantean otras dos consideraciones, a las que yo daría mucho peso. Una es que si al abrirse la comunicación con una civilización tecnológicamente superior, esa civilización pudiera escoger la explotación de la Tierra en lugar de explicarnos cuentos de hadas e historias.

El único paralelo que podemos aducir es el de la historia de los contactos humanos en la Tierra, y, a no ser que mi lectura de la historia esté radicalmente equivocada, el contacto entre los hombres ha demostrado que quienes disponen de poder, lo utilizan. Atenas fue un amo brutal.

MORRISON: ¡Oh no! Sócrates y Platón no eran en absoluto amos brutales comparados con la Europa del siglo XV.

MCNEILL: ¿Qué cree que estaba haciendo Pericles?

MORRISON: No me interpreta bien. Fue un tirano en vida, pero tras pasar por Tucídides y llevar muerto desde hace 2 000 años ha quedado reducido a un ejemplo moral.

MCNEILL: Supongamos que podemos eliminar el peligro de explotación, el peligro de invasión o de control a distancia, de modo que los seres humanos puedan dar de lado lo que quieran y prestar atención a lo que deseen; creo que en este caso, suponiendo que podamos descifrar, suponiendo que no haya peligro de explotación, el contacto representaría una ganancia neta evidente para el conocimiento humano. Si se nos puede asegurar la inmunidad contra la explotación y si podemos descifrar cosas en las cuales me mantengo excéptico, la ganancia es real.

Ha habido casos en el pasado humano de apertura de nuevas redes de comunicación con consecuencias muy notables. El caso que se presenta más fácilmente a mi mente es la iniciación de comunicaciones regulares entre los científicos y caballeros interesados de la Royal Society de Inglaterra con otras sociedades similares, que se expandió rápidamente por los demás Estados de Europa; creo que ése fue uno de los requisitos previos para el desarrollo y crecimiento firme de la ciencia moderna. Pero yo diría que la red cayó, por así decirlo,

sobre terreno fértil. Había gente que compartía muchas cosas en Holanda, en Inglaterra, en Francia e Italia, y es éste el terreno común que en mi opinión nos faltará con la inteligencia extraterrestre. Me resulta, pues, muy difícil de creer que una información científica útil, una información histórica, una experiencia literaria pueda pasar esta barrera cultural.

Ahora bien, yo no niego ni dudo que caso de iniciarse esta comunicación, la reacción de la humanidad sería muy fuerte: no por el contenido del mensaje, sino simplemente por el hecho de haber podido recibir un mensaje. Esta experiencia nos haría pensar a nosotros, seres humanos: «No estamos solos en el universo.» Creo que eso tiene un fuerte valor psicológico y su consecución podría justificar muy bien cualquier gasto aplicado a la búsqueda de inteligencias extraterrestres.

Tengo que decir que en las discusiones de estos últimos días creo que capté lo que podría denominarse una seudorreligión o religión científica. No lo digo en sentido condenatorio. Fe y esperanza y confianza han sido siempre factores muy importantes en la vida humana y no es un error asirse a ellas y continuar con esa fe. Pero temo que continuaré siendo un agnóstico, no sólo en la religión tradicional, sino también en esta nueva religión.

LEE: Usted dice que es un agnóstico en ambas religiones pero ¿por la existencia de qué Dios apuesta?

MCNEILL: Bien, ¿es necesario elegir? No dije que no haya que intentarlo. Quiero decir que, en mi opinión, la esperanza de un gran reembolso en un tiempo a escala humana, en un millar de años, me parece altamente improbable.

DRAKE: ¿Conoce usted otra secta agnóstica con misioneros?

MCNEILL: Sí, los budistas eran agnósticos, o por lo menos eran ateos. Quizá la palabra «agnóstico» no sea correcta en relación a los budistas, pero eran misioneros. Tengo que decir que las religiones seculares no son nuevas. Hay muchas, y muchas tienen misioneros.

VON HOERNER: Creo que si una cultura de la Edad de Piedra entra en contacto con nosotros, el hecho significará de modo absoluto el fin de esa cultura de la Edad de Piedra, aunque pueda tardar un tiempo; y si nosotros entramos en

contacto con una civilización superior, eso también significaría el fin de nuestra civilización, aunque podría tardar algo. Nuestro período cultural habría finalizado y nos fusionaríamos con una cultura interestelar mayor.

MCNEILL: Si puedo contestar, creo que la palabra «contacto» oculta dos realidades muy diferentes. El contacto que deja en libertad a la raza humana para aceptar o rechazar, que adopta la forma de señales de radio o algo de este tipo, no tendrá necesariamente, o incluso probablemente, un efecto destructivo muy drástico sobre nosotros. Sólo cuando no nos queda elección, cuando algún poder superior nos afecta, no limitándose a entregar símbolos inteligibles, sino de algún otro modo, podrá esperarse el fin de la civilización humana.

VON HOERNER: Yo pienso que los medios de comunicación, tanto si son por fuerza o son señales, definen únicamente la escala temporal del proceso.

MCNEILL: Esto supone que el mensaje es inteligible y que decidimos hacer algo en relación con él: que podemos decirles que lo entendemos.

VON HOERNER: Con tiempo suficiente, será inteligible.

MCNEILL: Pero quizá no deseen que se les entienda.

CRICK: Me gustaría hacer dos comentarios sobre lo dicho. Creo que no se tiene en cuenta la existencia de las matemáticas. Constituyen un lenguaje natural que puede considerarse común a ambas partes. Además, se puede poner fácilmente de un modo, con una notación, fácilmente transmitible.

Por los mismos motivos no resulta demasiado difícil empezar a explicar la física elemental y luego pasar en estadios fáciles a una física más complicada y luego en estadios sucesivos a la física que no conocemos. Este conocimiento es común. Creo que en opinión del profesor Morrison, cuando se pasa a algo como la literatura, la comunicación será muy difícil. En eso estoy de acuerdo con usted.

MCNEILL: ¿Puedo responder brevemente? La confianza que veo tienen muchos matemáticos y científicos de la naturaleza en que su lenguaje es universal me parece un caso de chauvinismo, para usar nuestro término favorito. No puedo demostrarlo, pero no creo que ustedes estén justificados al suponer automáticamente que nuestras matemáticas sean conmensurables con sus matemáticas.

CRICK: Pero ¿está de acuerdo en que han de tener matemáticas para poder establecer una comunicación?

MCNEILL: Debería ser así, efectivamente.

CRICK: ¿Y física también?

MCNEILL: Eso creo.

CRICK: No quisiera expresar una opinión sobre el tema estando presentes tantos eminentes matemáticos, pero me sorprendería que estuvieran de acuerdo con usted y no conmigo.

MCNEILL: Bien, eso ya lo sé.

CRICK: No creo que usted se dé cuenta de la fuerza del argumento.

Mi segundo punto es una cuestión de psicología humana. Usted está muy en lo cierto al decir que en esta habitación hay una mezcla de creyentes y de escépticos, y usted ha reconocido correctamente a los creyentes; pero algunos de nosotros también somos escépticos. Sin embargo, la historia de la ciencia demuestra que no sólo los creyentes abundan sino que los escépticos son demasiado escépticos. Hace sólo 100 o 150 años que Auguste Comte dijo que no sabríamos nunca de qué están hechas las estrellas, y hace sólo 45 años desde que lord Rutherford dijo que la energía atómica era imposible; por lo tanto, tengo que recomendarle prudencia sobre su cifra de un millar de años.

MCNEILL: Sí, estoy desde luego de acuerdo en que la mayoría de los escépticos han sido siempre muy escépticos y los creyentes han sido frecuentemente los vehículos de importantes innovaciones. Un hombre como Kepler era un chiflado, pero llegó muy lejos al deducir las órbitas planetarias.

OLIVER: Las observaciones del doctor McNeill me han interesado mucho porque reflejan opiniones que seguramente encontraremos en las personas educadas que no tienen un conocimiento íntimo de la ciencia y del problema de la comunica-

ción interestelar. Digo, por lo tanto, que tienen un peso político.

Me gustaría ampliar ligeramente las observaciones del doctor Crick. Creo que la idea de que tendremos muchas dificultades en la comunicación se basa en una minusvaloración de la cantidad de conocimiento que tendremos automáticamente en común con cualquier otro ser o raza inteligente. Yo recordaría al doctor McNeill que otra especie inteligente muy probablemente dispone también de visión ocular y que es técnicamente posible enviar mensajes muy obviamente decodificables en imágenes, lo que nos abre el mismo camino del aprendizaje entre cualquier par de culturas que no comprenden sus respectivos lenguajes. Podemos dibujar imágenes.

En segundo lugar, creo que el doctor McNeill sobrevalora la facilidad del viaje interestelar. No me uniré a los escépticos que, como ha dicho el doctor Crick, se han equivocado en el pasado diciendo que es imposible, pero yo diría que en muchos órdenes de magnitud es más difícil que la comunicación por radio, y que cualquier civilización que haya conseguido viajar entre las estrellas estará tan avanzada que no se preocupará de nosotros.

PEŠEK: Mi opinión personal es que CETI puede ayudarnos a resolver nuestros problemas terrestres y aumentar la duración de la vida de nuestra civilización, es decir, aumentar L en la ecuación (1). Las posibles consecuencias serán una revolución en la ciencia y la tecnología.

GINZBURG: Me gustaría decir algo siguiendo las mismas líneas del doctor Oliver, pues creo que se trata de un punto muy importante. Ya ven que aquí tenemos de modo definido creyentes y escépticos: pero me parece que también puede haber oscurantistas: gente que niega la existencia del problema, y cree que no hay nada que pensar, nada que hacer. Desde este punto de vista no hay nada más peligroso que hablar del peligro de la comunicación. Desde luego, ninguna de las observaciones del doctor McNeill tiene nada en común con esa postura. Pero creo que si no queremos dejar cerrado el problema totalmente, para siempre, debemos subrayar del modo más positivo posible (y creo que podemos hacerlo) que no hay en absoluto ningún peligro. En primer lugar, no hay ningún peligro si sólo recibimos una comunicación. Si no contestamos, no harán nada. No sabrán siquiera que hayamos recibido el mensaje. No puedo ni imaginar un peligro, porque ellos no pueden entender que estemos buscando sus señales.

Pero incluso, como dijo el doctor Oliver (y yo estoy de acuerdo), incluso suponiendo que tratemos de contestar, incluso en este caso es extraordinariamente improbable que haya algún peligro. Todos nosotros, independientemente de nuestras opiniones, estamos interesados en el problema CETI. Creo que nuestra obligación es recalcar que este problema no puede razonablemente constituir ningún peligro para la sociedad humana. Creo que podemos dar plena garantía de ello.

SHKLOVSKY: Me gustaría citar las palabras del conocido profesor Sakharov, cuando decía que esta información sería útil para personas razonables y amables, y sería peligrosa para personas estúpidas y groseras.

MORRISON: Creo que la discusión ha sido muy interesante. Muchos de los puntos que me hubiera gustado discutir se han discutido ya. Permítanme que los repita.

El contenido del mensaje no será una simple retahíla de símbolos, ningún conjunto de símbolos matemáticos solos, sino un cinema muy rico, tridimensional, en movimiento, cuidadosamente escalado. Creo que se avanzaría mucho en la constitución de un contexto donde entraría en juego la experiencia. Creo que el problema de la universalidad de las matemáticas es principalmente una falta de comprensión del lenguaje. Un matemático dice muy correctamente: la clave de las matemáticas es la infinidad. Pero me imagino que la base matemática principal de la unidad que buscamos, de la comunicación, se limitaría al principio únicamente a las matemáticas finitas de los números enteros, y creo que éstas son probablemente las estructuras más universales.

Estoy muy de acuerdo en que los refinamientos de la lógica serán tan difíciles de establecer a partir del mensaje distante como sucede aquí, pero creo realmente que la riqueza de las señales, suponiendo un canal ancho de radiofrecuencia y una planificación extraordinariamente cuidadosa del mensaje, no resultará, como traté de recalcar, una tarea fácil de descifrar, pero sí totalmente posible: no será leer un periódico sino adentrarse en un texto rico, difícil, sobre un tema avanzado, lleno de diagramas, de alusiones y de ejemplos.

RECAPITULACIÓN

SAGAN: Creo que puedo hablar en nombre de todos para decir que ésta ha sido una conferencia notablemente estimulante y productiva. Es lógico que la búsqueda de inteligencias extraterrestres sólo pueda ser internacional, y esta conferencia ha tenido un acentuado carácter internacional. La búsqueda de ETI requiere el más amplio abanico de disciplinas científicas y creo que en pocas conferencias se ha reunido una representación de expertos en un conjunto tan amplio de materias como ésta. Desde luego no hemos llegado a la solución de muchas cuestiones referentes a la estrategia de la búsqueda. Pero aquí se ha expresado todo un conjunto de nuevas ideas, y se ha hecho también el primer anuncio público de un programa de búsqueda, pequeño pero muy importante. Creo que a largo plazo la importancia de esta conferencia de Byurakan residirá en haber convertido el tema de la comunicación con inteligencias extraterrestres en algo científicamente respetable. Puedo decir de parte de la delegación americana lo agradecidos que estamos a las Academias soviética y armenia de Ciencias y al profesor Ambartsumian por haber contribuido a que esta importante reunión fuera posible. El doctor Morrison tiene algunas observaciones finales.

MORRISON: Intentaré muy rápidamente llevar a cabo un cálculo final. Si uno ha de reunirse para discutir, CETI deberá contar con un factor físico: un cielo azul, un lago azul, unos picos nevados; con un factor histórico: una escritura antigua y plantas hidroeléctricas modernas; y con un factor científico: el gusto de trabajar en un lugar donde el espíritu de investigación está vivo. Finalmente, es indispensable disponer de un factor humano: calor y acogida.

Es evidente que el producto de todas estas probabilidades

debería ser muy pequeño. Sin embargo, todos los factores estaban presentes en el Observatorio de Byurakan de la República de Armenia. Es un presagio muy favorable. De parte del comité organizador americano, y estoy seguro que de muchos otros, les doy muchas gracias. Confiamos volver algún día.

AMBARTSUMIAN: Muchas gracias. Sus palabras nos han conmovido profundamente y confiamos que todos ustedes volverán. Y ahora me gustaría desearles un feliz viaje de regreso. *Bon voyage.*

RESOLUCIONES DE LA CONFERENCIA: PRIMERA CONFERENCIA SOVIÉTICO-AMERICANA SOBRE LA COMUNICACIÓN CON INTELIGENCIAS EXTRATERRESTRES (CETI)

La primera conferencia internacional sobre el problema de las civilizaciones extraterrestres y el contacto con ellas se celebró del 5 al 11 de setiembre de 1971 en el Observatorio Astrofísico de Byurakan de la Academia de Ciencias de Armenia, U.R.S.S. La Conferencia reunió a científicos calificados que trabajan en campos diversos –astronomía, física, radiofísica, ciencia y tecnología de computadoras, química, biología, lingüística, arqueología, antropología e historia e incluía a muchos eminentes científicos. La conferencia fue organizada conjuntamente por la Academia Nacional de Ciencias de los EE. UU. (con ayuda de la Fundación Nacional de Ciencias de los EE. UU.) y la Academia de Ciencias de la U.R.S.S. Participaron científicos de otros varios países.

Se discutieron con detalle muchos aspectos del problema de las civilizaciones extraterrestres durante las diez sesiones de la conferencia. Se dedicó especial atención a las siguientes cuestiones: la pluralidad de sistemas planetarios en el universo, el origen de la vida en la Tierra, la posibilidad de que aparezca la vida en los cuerpos cósmicos, el origen y evolución de la inteligencia, el origen y desarrollo de las civilizaciones tecnológicas, los problemas de la búsqueda de señales inteligentes o de pruebas de actividades de ingeniería astral, y los problemas y posibles consecuencias del contacto con civilizaciones extraterrestres.

Los participantes de la conferencia difirieron en muchos detalles de estas cuestiones, pero estuvieron de acuerdo en que los beneficios del contacto con tales civilizaciones extraterrestres son suficientemente elevados para justificar que se emprenda una variedad de programas de investigación bien formulados; estuvieron también de acuerdo en que la tecnología actual puede ser capaz de establecer contacto con tales

civilizaciones. Se han llevado a cabo algunas búsquedas preliminares radioastronómicas tanto en los EE. UU. como en la U.R.S.S.

Los participantes en la conferencia llegaron a las siguientes conclusiones:

1. Los sorprendentes descubrimientos de los últimos años en los campos de la astronomía, la biología, la ciencia de computadoras y la radiofísica han desplazado algunos de los problemas de las civilizaciones extraterrestres y su detección del reino de la especulación a un nuevo reino de experimentos y observación. Por primera vez en la historia humana se han podido llevar a cabo investigaciones experimentales serias y detalladas sobre este problema fundamental e importante.

2. Este problema puede resultar de profunda significación para el desarrollo futuro de la humanidad. Si se llega a descubrir civilizaciones extraterrestres, el efecto sobre las capacidades humanas en la ciencia y la tecnología será inmenso y el descubrimiento puede influir positivamente sobre todo el futuro del hombre. La significación práctica y filosófica de un contacto logrado con una civilización extraterrestre sería tan enorme que justificaría la aplicación de esfuerzos substanciales. Las consecuencias de tal descubrimiento constituirían una gran aportación al total del conocimiento humano.

3. Los recursos científicos y técnicos de nuestro planeta son ya lo bastante grandes para que nos permitan iniciar investigaciones destinadas a la búsqueda de inteligencias extraterrestres. Tales estudios deberían dar, en principio, importantes resultados científicos aunque no tuviera éxito la búsqueda concreta de inteligencias extraterrestres. Actualmente estas investigaciones se pueden llevar a cabo de modo efectivo en los diversos países por parte de sus propias instituciones científicas. Pero incluso en este estadio primero, sería útil discutir y coordinar programas concretos de investigación e intercambio de información científica. Sería deseable combinar en el futuro los esfuerzos de los investigadores de varios países para conseguir los objetivos experimentales y de observación. Nos parece apropiado que la búsqueda de inteligencias extraterrestres corra a cargo de representantes de toda la humanidad.

4. En la conferencia se discutieron detalladamente varios modos de búsqueda de inteligencias extraterrestres. La realización de la propuesta más elaborada exigiría tiempo y esfuerzos considerables y el gasto de fondos comparables a los fondos dedicados a la investigación espacial y nuclear. Sin embargo se pueden iniciar búsquedas útiles a una escala muy modesta.

5. Los participantes en la conferencia consideran muy valiosos los actuales y futuros experimentos con vehículos espaciales destinados a buscar vida en otros planetas de nuestro sistema solar. Recomiendan continuar y reforzar el trabajo en campos como la química orgánica prebiológica, la búsqueda de sistemas planetarios extrasolares y la biología evolutiva, que tienen inmediata repercusión sobre el problema.

6. La conferencia recomienda iniciar nuevas y concretas investigaciones sobre los modos de búsqueda de las señales. Se incluye en apéndice una lista de algunas investigaciones posibles.

7. La conferencia sugiere el establecimiento por los medios adecuados de un grupo internacional de trabajo que coordine los programas nacionales de investigación y que promueva el progreso en este campo. De momento se propone el siguiente grupo provisional de trabajo: F. Drake, EE. UU.; N. S. Kardashev, U.R.S.S.; P. Morrison, EE. UU.; B. Oliver, EE. UU.; R. Pešek, Checoslovaquia; C. Sagan, EE. UU.; I. S. Shklovsky, U.R.S.S.; G. M. Tovmasyan, EE. UU.; y V. S. Troitsky, U.R.S.S.

8. Los participantes en la conferencia encarecen la publicación total y abierta de los resultados de investigación sobre esos problemas, y como un paso en este sentido planean la publicación simultánea de las actas de la actual conferencia en ruso e inglés.

9. El grupo provisional de trabajo recibe el encargo de convocar, cuando sea necesario, reuniones de base más amplia o más especializada con científicos que trabajan sobre CETI.

10. Los participantes de la conferencia expresan su cordial aprecio por la espléndida hospitalidad otorgada a ellos por la Academia de Ciencias de Armenia.

Firmado: Los comités organizadores de las delegaciones de EE. UU. y la U.R.S.S., en nombre de los participantes en la conferencia.

Lista de posibles campos de investigación

Sería útil concentrar los esfuerzos en dos direcciones que parecen igualmente prometedoras:

I. Búsqueda de civilizaciones de un nivel técnico comparable al nuestro.

II. Búsqueda de civilizaciones con un nivel técnico ampliamente superior al nuestro.

Deberían participar en la planificación de esta investigación un amplio círculo de especialistas, desde astrofísicos a historiadores.

Por lo tanto, recomendamos:

1. La búsqueda de señales y pruebas de ingeniería astral en la radiación de unos cuantos centenares de estrellas próximas seleccionadas y de un número limitado de otros objetos escogidos, que cubra el intervalo de longitudes de onda desde las visibles a las decimétricas, utilizando los mayores instrumentos astronómicos existentes.

2. La búsqueda de señales emitidas por fuentes potentes dentro de las galaxias del grupo local, incluyendo la búsqueda de señales con fuertes impulsos.

3. La exploración de la región de mínimo ruido en la banda submilimétrica para poder determinar su adecuación a la observación de civilizaciones extraterrestres.

Son de desear los siguientes estudios:

4. El diseño, entre otros, de nuevos y potentes instrumentos astronómicos con los siguientes parámetros aproximados:

a) Un radiotelescopio decimétrico con un área efectiva de un kilómetro cuadrado.

b) Un telescopio de onda milimétrica con un área efectiva de 10^4 metros cuadrados.

c) Un telescopio de onda submilimétrica con un área efectiva de 10^3 metros cuadrados.

d) Un telescopio infrarrojo con un área efectiva de 10^2 metros cuadrados.

Todos los instrumentos descritos tienen la capacidad de proporcionar datos importantes sobre temas muy distintos de CETI.

5. La definición de un sistema para mantener todo el cielo bajo una constante vigilancia, que pudiera conducir a una búsqueda de ámbito más amplio que los correspondientes a los números 1 y 2.

APÉNDICE A

NATURALEZA DE LAS AFIRMACIONES DE PROBABILIDAD AL DISCUTIR LA PREVALENCIA DE VIDA EXTRATERRESTRE INTELIGENTE

TERRENCE FINE
Escuela de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Cornell, Ithaca, Nueva York

INTRODUCCIÓN

Los intentos de formular declaraciones de probabilidad significativas sobre la prevalencia de vida extraterrestre inteligente (VETI) han provocado importantes críticas y han chocado con obstáculos considerables. Nosotros creemos que el avance en esta cuestión exigirá un examen explícito de los diversos tipos de afirmaciones y conceptos de probabilidad para rechazar los que sean claramente inadecuados y seleccionar formas razonables y tratables. Se puede encontrar en Fine (1972) una discusión general de las diferentes teorías de probabilidad. Nuestro apresurado repaso de la naturaleza de la probabilidad sugerirá que actualmente el tipo más realista de declaración de probabilidad en cuestiones referentes a VETI tiene una forma comparativa y una base de interpretación subjetiva.

TIPOS DE AFIRMACIONES DE PROBABILIDAD

Las declaraciones de probabilidad pueden distinguirse con respecto a sus formas y a sus bases interpretativas.

Formas

Las tres formas básicas son:
Cuantitativa: asigna un número entre [0, 1] a cada acontecimiento o afirmación en una colección adecuada (álgebra σ), por ejemplo, P (existe VETI) = 0,6.
Comparativa: determina cuál de un par de acontecimientos es más probable, pero no por cuánto lo es; por ejemplo, «VETI es más probable en nuestra Galaxia que en Andrómeda».

Modal: identifica simplemente los acontecimientos probables; por ejemplo, «VETI es probable en nuestra Galaxia».

La forma cuantitativa es la más corriente en la práctica científica, pero las formas más modestas, comparativa y modal, tienden a ser descripciones más realistas de la incertidumbre. A pesar de posibles apariencias, las formas modal y comparativa no pueden reducirse en general a términos cuantitativos; son formas más débiles, pero su aplicación es más general. Parece razonable creer que las afirmaciones sobre VETI podrían formularse mejor en términos comparativos, términos que, sin embargo, pueden usarse fructíferamente para tomar decisiones, por ejemplo, sobre las direcciones deseables de la investigación, mejor que en la forma cuantitativa más concreta y, por lo tanto, más elusiva. Se tiene en Carnap (1962) y en Fine (1972) más material sobre las formas comparativa y modal de las declaraciones de probabilidad.

Bases interpretativas

Las bases interpretativas de un concepto de probabilidad indican como hay que medirlo, valorarlo o estimarlo y cómo puede usarse o aplicarse correctamente. Las tres interpretaciones esenciales, cada una con variantes, son la frecuencia de incidencia de acontecimientos en intentos repetidos e inconexos, el grado lógico de confirmación de una hipótesis por evidencia; y las declaraciones de fe subjetivas, introspectivas.

INTERPRETACIÓN DE LA FRECUENCIA

La interpretación de la frecuencia es la que practican las ciencias con mayor amplitud; por ejemplo, tras de haber encontrado VETI en un *p* por ciento de los numerosos sistemas de una clase determinada que hemos examinado, «estimamos» que la probabilidad de que el siguiente sistema por examinar de esta clase tenga VETI es «aproximadamente» *p*. El método de frecuencias trata de identificar y luego de extrapolar directamente tendencias en formas de incidencia. Se cree generalmente que proporciona un concepto objetivo y empírico de la probabilidad y que, por lo tanto, resulta adecuado para la ciencia. Sin embargo, científicos físicos razonables y muchos filósofos han sostenido que el sistema de frecuencias es ambiguo y que su objetividad es ilusoria. Feynman dice (1963): «La probabilidad depende por lo tanto de nuestro conocimiento y de nuestra capacidad para formular estimaciones. En realidad, de nuestro sentido común» (6-2). «Probablemente es mejor darse cuenta de que el concepto de probabilidad es, en cierto modo, subjetivo...» (6-7).

¿Cómo sabemos que dos sistemas no idénticos son de la misma clase y que podemos extrapolar? ¿Qué formas o tendencias debemos extrapolar entre la gran cantidad existente? ¿Qué nos garantiza la persistencia de una tendencia concreta? En la práctica, quienes formulan estimaciones que proporcionan las definiciones de trabajo de la probabilidad a base de frecuencias tienen componentes importantes de tipo subjetivo y no empírico que inciden en la elección personal de procedimientos estadísticos y en la selección y censura de los datos. Es evidente, finalmente, que la concepción de frecuencia no afecta a los temas planteados normalmente por la cuestión VETI; los datos necesarios, sean los que fueren en realidad, está claro que faltan en este caso.

INTERPRETACIÓN LÓGICA

La interpretación lógica de la probabilidad trata de ofrecer, mediante un análisis de razonamiento inductivo, un procedimiento objetivo, lógico (analítico) para determinar el grado de apoyo o de confirmación que un conjunto de afirmaciones sobre datos presta a una hipótesis o teoría. La confusa teoría clásica o laplaciana de la probabilidad (basada en casos igualmente probables aducidos a partir de un equilibrio de evidencias) es probablemente la teoría informal más conocida de la probabilidad lógica cuantitativa. Las teorías de probabilidad lógica más desarrolladas se deben a Carnap (1962) y a Solomonoff (1964), y por ahora están muy poco desarrolladas para su aplicación significativa. La noción de un grado lógico objetivo de apoyo a los datos y a la teoría es atractiva y útil para la cuestión VETI, pero por ahora no hay perspectivas de que ese método se desarrolle hasta el punto de poderlo aplicar a cuestiones científicas complejas de este tipo. Tampoco puede esperarse mucho más de las primitivas teorías lógicas actuales modal y comparativa.

INTERPRETACIÓN SUBJETIVA

La interpretación subjetiva o personalista de la probabilidad abogada por Savage (1954), Pratt, Raiffa, Schlaifer (1965) y otros plantea que las afirmaciones de probabilidad se derivan a través de un proceso en gran parte autónomo de introspección y se aplican luego a la selección de decisiones o actos óptimos, como la dedicación de los recursos de investigación. La opinión subjetiva admite francamente el elemento subjetivo en la mayoría de los demás conceptos de probabilidad y anima al protagonista a utilizar a fondo su juicio informal, sus creencias, su experiencia en la formulación de estimaciones de probabilidad

cuyo objetivo sea la toma de decisiones y la comunicación interpersonal del juicio individual, en lugar, por ejemplo, de evaluar la «verdad» de las proposiciones. Las afirmaciones subjetivas de probabilidad son efectivamente personales, pero no arbitrarias. Hay axiomas razonables de consistencia interna entre evaluaciones y limitaciones que obligan a quienes los usan a aprender de la experiencia de un modo razonablemente explícito. No es posible criticar ninguna evaluación subjetiva de probabilidad, pero es posible criticar una colección de tales evaluaciones.

El sistema subjetivo se ha discutido y aplicado ampliamente en las decisiones empresariales (Schlaifer, 1969) y en el análisis de confianza, pero en pocos casos más. Sus limitaciones son evidentes, pero lo propio sucede con todos los demás sistemas de probabilidad. Nosotros diríamos que el concepto de probabilidad subjetiva es en la actualidad la única base sobre la cual pueden formularse declaraciones de probabilidad referentes a VETI.

REFERENCIAS

CARNAP, R. (1962), *Logical Foundations of Probability*, 2.ª ed., Chicago: University of Chicago Press.

FEYNMAN, T., et al. (1963), *The Feynman Lectures on Physics*, v. I., Reading, Mass.: Addison-Wesley.

FINE, T. (1972), *Theories of Probability: An Examination of Foundations*, Nueva York: Academic Press, 1972.

PRATT, J., H. RAIFFA, R. SCHLAIFER (1965), *Introduction to Statistical Decision Theory*, Nueva York: McGraw-Hill.

SAVAGE, L. (1954), *The Foundations of Statistics*, Nueva York: Wiley.

SCHLAIFER, R. (1969), *Analysis of Decisions Under Uncertainty*, Nueva York: McGraw-Hill.

SOLOMONOFF, R. (1964), *A Formal Theory of Inductive Inference*, Part I. *Information and Control* 7: 1-22.

APÉNDICE B

COMENTARIOS ADICIONALES SOBRE «LA NO PREVALENCIA DE LOS HUMANOIDES»*

G. G. SIMPSON

Departamento de Paleontología de los vertebrados

Universidad de Harvard, Cambridge, Massachusetts,

Universidad de Arizona, Tucson, Arizona.

La cuestión que ahora se plantea sobre «la probabilidad del origen de la inteligencia no necesaria ni remotamente humana» puede dar un aspecto irrelevante a mi discusión de los «humanoides». De hecho la cuestión es digna de una «ciencia» que carece de tema conocido. Una inteligencia que ni remotamente sea humana es como una vista que ni remotamente implique la visión, o mejor, como una comunicación entre seres sin medios posibles de entenderse. Mi discusión sobre los humanoides postula una semejanza suficiente para que la comunicación sea posible. Si la comunicación es imposible, la búsqueda de señales de vida fuera del sistema solar resulta actualmente imposible, cuando menos por esta razón.

El conocimiento de Venus y de Marte ha aumentado considerablemente en los últimos ocho años. Nos confirma la virtual imposibilidad de una vida en Venus basada en el carbono y reduce mucho las posibilidades de una vida de este tipo en Marte. Las posibilidades de vida inteligente (incluso *remotamente* humana) en otro planeta o en otro cuerpo de nuestro sistema solar son evidentemente lo más próximas a cero.

Las pruebas sobre el origen espontáneo y determinista de moléculas orgánicas perbiológicas continúan acumulándose. Las pruebas sobre los detalles del paso realmente crucial desde el estadio anterior a la vida celular (verdadera) continúan faltando virtualmente, aunque sepamos lo que ha sucedido luego.

Hay actualmente pruebas convincentes de que los organismos celulares existieron en la Tierra no sólo desde hace dos sino incluso desde hace tres mil millones de años. Esto *disminuye* la probabilidad de un origen paralelo de la inteligencia en otras partes.

Algunos biólogos más han calculado independientemente que una probabilidad así es tan pequeña que casi se anula (por ejemplo, H. Blum, *Nature* 206: 131). Los astrónomos, los físicos y los químicos continúan siendo los principales defensores de la idea, porque ignoran la biología, e incluso algunas autoridades altamente respetables de

* Cf. G. G. SIMPSON, «The Nonprevalence of Humanoids», *Science* 143, 1964, 769.

estos campos la ridiculizan (por ejemplo, D. Menzel, *Grad. Journal* 7: 195).

Si el universo es infinito, el número de estrellas y de posibles planetas también es infinito y las estimaciones absurdamente variables de estas cifras son ridículas. Las estimaciones sólo tienen sentido si se refieren a aquellos con quienes podemos comunicarnos. Estas estimaciones varían enormemente, pero hay buenos motivos para dudar de las afirmaciones más altas sobre el número de planetas accesibles (por ejemplo, S. Kunar, An. New York Acad. Sci., 163: 94). Y además lo cierto es que no se ha observado objetivamente ni se conoce de hecho que exista ni un solo planeta de tipo terrestre fuera de nuestro sistema solar. La exobiología es todavía una «ciencia» *sin* datos; por lo tanto, no es ciencia.

Algunos científicos respetables por otros conceptos, como un colega muy llorado de la Universidad de Arizona que se suicidó recientemente, han continuado creyendo que algunos OVNI disponían de una conducción extraterrestre. Eso no pasa de ser un monumento a la credulidad. Las «pruebas» en favor de la brujería son mucho mejores. Las antirreferencias consistentes forman legión; vean como única muestra W. Markowitz, *Science* 157: 1 274).

Es cierto que no se han presentado todavía pruebas convincentes de organismos fósiles en meteoritos, pero se han obtenido más pruebas creíbles no concluyentes sobre compuestos de probable origen orgánico en meteoritos. Hay que hacer una distinción entre «orgánico» y «biogenético». No hay todavía pruebas creíbles de que estos compuestos fueran biogenéticos, y esta pretensión no se ha repetido recientemente.

Tras la publicación de mi artículo de 1964 en *Science* se me acusó de desfigurar los gastos sobre la exploración de vida extraterrestre. Como puede comprobar cualquiera que lea de verdad aquel artículo, en realidad no dije que se dedicaran gastos de todo tipo a esta exploración, aunque de hecho se dedicaban sumas considerables. Lo que dije era que se aducía el posible descubrimiento de vida extraterrestre como una razón o excusa para la exploración espacial en general, en la cual se gastaban miles de millones de dólares. Esto se puede comprobar muy fácilmente; véase, por ejemplo, el informe NAS-NRC sobre «Biología y exploración de Marte», C. S. Pittendrigh, presidente. Los miles de millones ya no se gastan al mismo ritmo, pero continúan siendo miles de millones y la «exobiología» continúa participando como argumento, tanto si los «exobiólogos» consideran que se llevan su parte como si no.

Un crítico amistoso (Philip Morrison) del conocido libro de Shklovsky y Sagan sobre *Vida inteligente en el universo* escribió: «Tenemos aquí un conjunto bibliográfico cuya relación resultados/artículos es inferior a cualquier otro.» Sugiero que los participantes piensen en esto cuando vuelva a convocarse otra conferencia sobre el tema.

APÉNDICE C

SOBRE LA DETECTIVIDAD DE CIVILIZACIONES GALÁCTICAS AVANZADAS*

CARL SAGAN
Laboratorio de Estudios Planetarios
Universidad de Cornell, Ithaca, Nueva York

La humanidad posee ya la capacidad tecnológica de comunicar por radiofrecuencias a distancias de muchos centenares de años-luz, con civilizaciones técnicas no más avanzadas que nosotros. Pero antes de iniciar un programa de búsqueda sistemática de tales señales es importante demostrar por lo menos una probabilidad modesta de que existe una civilización técnica dentro de esta distancia. La posibilidad de que existan civilizaciones mucho más avanzadas –sociedades que puedan detectarse a distancias mucho mayores– se discutirá ahora. Los riesgos de poner valores numéricos a las probabilidades componentes de N, el número de civilizaciones técnicas existentes en la Galaxia, son numerosos y traicioneros; sin embargo, parece que existe un factor limitante cuya importancia no siempre ha sido apreciada.

Hay disponibles actualmente formulaciones mucho más sofisticadas (véase, por ejemplo, Kreifeldt, 1971), pero la primera expresión algebraica de N, debida en su formulación original a F. D. Drake, nos será de utilidad:

$$N = RL. \quad (1)$$

R es el ritmo de aparición de civilizaciones técnicas comunicativas en la Galaxia y es función de la velocidad de formación estelar, de la fracción de estrellas que tienen planetas, del número de planetas por estrella que son ecológicamente adecuados para el origen de la vida, la fracción de tales planetas en los cuales se da de hecho el origen de la vida, la fracción de tales planetas en los que surge realmente la inteligencia y eventualmente las civilizaciones técnicas (véase, por ejemplo, Shklovsky y Sagan, 1966; desde ahora referencia S[2]); L es la duración media de tales civilizaciones y está fuertemente sesgada hacia la pequeña fracción de civilizaciones técnicas que consiguen vivir mucho tiempo –duraciones medidas en escalas de tiempo evolutivo geológico o estelar (ref. S[2])–. Pero tales civilizaciones tendrán un adelanto inconcebible con respecto a nosotros. Basta considerar los

* Reimpreso de *Icarus* 19, 1973, pp. 350-352.

cambios que ha experimentado la humanidad en los últimos 10^4 años y las dificultades potenciales que tendrían nuestros antepasados del pleistoceno para acomodarse a nuestra sociedad actual y comprenderemos qué insondable brecha cultural representan 10^8 o 10^{10} años, incluso con una velocidad de avance intelectual mínima. Estas sociedades habrán descubierto leyes de la naturaleza e inventado tecnologías cuyas aplicaciones nos parecerán indistinguibles de la magia. Se plantea la cuestión seria de si tales sociedades se preocupan de comunicar con nosotros, del mismo modo que nosotros no nos preocupamos de comunicar con nuestros antecesores protozoicos o bacterianos. Podemos estudiar los microorganismos, pero normalmente no nos comunicamos con ellos. Planteo, pues, la posibilidad de que exista un horizonte en el interés por comunicarse en la evolución de las sociedades tecnológicas, y que una civilización mucho más avanzada que la nuestra está ocupada en un activo tráfico de comunicaciones con sus iguales; pero no con nosotros, y no a través de las tecnologías que nos son accesibles. Quizá seamos como los habitantes de los valles de Nueva Guinea, que pueden comunicarse por mensajeros o con tambores, pero que desconocen el vasto tráfico internacional por cable y por radio que les pasa por encima, alrededor y a través de ellos.

Kardashev ha proporcionado (1962) una subdivisión conveniente de las sociedades tecnológicas. Distingue las civilizaciones de tipo I, de tipo II y de tipo III. La primera puede utilizar más o menos la energía actual generada en el planeta Tierra para la conversación interestelar; la segunda, la energía generada por el Sol, y la tercera, la energía de una galaxia. Por definición, las civilizaciones de tipo I pueden reestructurar planetas; las civilizaciones de tipo II pueden reestructurar sistemas solares, y las civilizaciones de tipo III pueden reestructurar galaxias. Creo que una civilización perteneciente aproximadamente al tipo II ha alcanzado nuestro horizonte de comunicaciones, con una excepción que describiré después. Supongo también por motivos de cálculo que una civilización que ha emergido al nivel de las tecnologías de tipo II ha superado también con éxito el período crítico de probable autodestrucción tecnológica: el período en el cual se encuentra sumergida ahora la civilización terrestre.

Estas ideas pueden reformularse del modo siguiente: sea f_g la fracción de las civilizaciones tecnológicas que sobreviven durante escalas temporales evolutivas geológicas o estelares L_g, y sea L_d el tiempo medio de autodestrucción de las civilizaciones de tipo I que no alcanzan las tecnologías de tipo II. Entonces,

$$L \sim (1 - f_g)L_d + f_g L_g. \qquad (2)$$

Por lo tanto, el número total de civilizaciones existentes en la Galaxia,

$$N \sim R[(1 - f_g)L_d + f_g L_g], \qquad (3)$$

es diferente del número de civilizaciones dentro de nuestro horizonte comunicativo.

$$N_c \sim N_I \sim R[(1 - f_g)L_d]. \qquad (4)$$

La relación de estas duraciones es

$$N_c/N \sim [1 + f_g(L_g/L_d)]^{-1}, \quad \text{para} \quad f_g \ll 1 \qquad (5)$$

$$\sim (L_d/f_g L_g), \quad \text{para} \quad f_g L_g \gg L_d. \qquad (6)$$

Las ecuaciones (5) y (6) son independientes de R. De las civilizaciones situadas dentro de nuestro horizonte de comunicaciones sólo

$$N_c' \sim R f_g (1 - f_g) L_d \qquad (7)$$

están destinadas a tener duraciones $> > L_d$.

Pasemos ahora a algunos casos numéricos concretos ilustrativos. Recalco que pueden imaginarse perfectamente valores que difieran de los que escojo en varios órdenes de magnitud y continuar siendo probables. Adoptamos (ref. S[2]) $L_g \sim 10^9$ años, $f_g \sim 10^{-2}$, y $R \sim 10^{-1}$ por año. Además supongo que $L_d \sim 10^3$ años. Los acontecimientos de las últimas décadas pueden indicar que quizá L_d sea uno o dos órdenes de magnitud más pequeño; las conclusiones resultantes serán en este caso más pesimistas. Con independencia del valor escogido para L_d, mientras sea $L_d < < L_g$, vemos que $L \sim 10^7$ años, y $N \sim 10^6$ civilizaciones galácticas (ref. S[2]). Si se supone que estas civilizaciones están distribuidas al azar, la distancia media a la más próxima es de unos cuantos centenares de años-luz, y parecería justificada la búsqueda de tales civilizaciones utilizando la tecnología existente. Sin embargo, si contamos sólo las civilizaciones situadas dentro de nuestro horizonte de comunicaciones vemos con las mismas cifras escogidas que

$$N_c/N \sim 10^{-4}$$

y

$$N_c \sim 100.$$

En este caso la distancia a la civilización comunicativa más próxima es $\sim 10^4$ años-luz: distancia que supera del todo nuestra capacidad actual, suponiendo que nuestro comunicante esté aproximadamente al mismo nivel tecnológico. Y de estas 100 sociedades sólo es probable que evite la autodestrucción $N_c' \sim 1$.

Casi todas estas 100 civilizaciones del tipo I o más recientes han de tener tecnologías con un avance significativo respecto a nosotros, y puede muy bien ser posible el contacto con ellas. Pero las perspectivas son mucho menos claras que si hay 10^6 civilizaciones galácticas comunicativas. Puede mejorarse algo la situación tomando $L_d <$ el intervalo al horizonte de comunicaciones, y no como hemos supuesto aquí; pero fuimos optimistas al escoger L_d y me parece difícil imagi-

nar que muchas civilizaciones a > 10^3 años en nuestro futuro tecnológico estén ansiosas de comunicar con nosotros.

Parece que nos encontramos en una situación tal que las civilizaciones de tipo II o más avanzadas están, en función de la tecnología contemporánea de las comunicaciones terrestres, a distancias pequeñas de nosotros, pero por lo mismo no son comunicativas; mientras que las civilizaciones de tipo I pueden ser comunicativas, pero tienden a estar demasiado lejos para que podamos detectarlas. Se deduce la consecuencia operativa de que la detección de civilizaciones de tipo I o más jóvenes es más difícil de lo que se ha supuesto generalmente, y que una empresa de este tipo requerirá sistemas de radio mucho más elaborados -por ejemplo, grandes sistemas en fase- que los existentes actualmente, y tiempos muy largos de observación para buscar entre las $\sim 10^9$ que hay que distinguir para encontrar una de estas civilizaciones.

Por otra parte hay que prestar una atención algo más seria a la cuestión de las civilizaciones de tipo II y de tipo III, nivel que ocupan según el argumento anterior la mayoría de las sociedades técnicas del universo. Una civilización de tipo II puede comunicar con la Tierra desde las galaxias, más próximas; una civilización de tipo III puede comunicar a través del universo conocido: y eso utilizando únicamente las leyes de la naturaleza que comprendemos actualmente. Basta con que exista una mínima fracción de tales civilizaciones interesadas en modos anticuados de comunicación para que dominen el tráfico de comunicaciones interestelares accesible ahora en la Tierra. La mejor política podría ser, por lo tanto, la búsqueda con la tecnología existente de civilizaciones de tipo II o de tipo III entre las galaxias más cercanas, y no buscar civilizaciones de tipo I o más recientes entre las estrellas más próximas.

REFERENCIAS

KARDASHEV, S. (1964), «Transmission of Information by Extraterrestrial Civilizations», *Astrononicheskii Zh.* 41: 282. (Traducción inglesa en *Soviet Astronomy*, A. J., 8: 217.)

KREIFELDT, J. G. (1971), «A Formulation for the Number of Communicative Civilizations in the Galaxy», *Icarus* 14: 419-430.

SHKLOVSKY, I. S. y CARL SAGAN (1966) (ref. S²), *Intelligent Life in the Universe*, San Francisco: Holden-Day.

APÉNDICE D

EL MUNDO, LA CARNE Y EL DEMONIO*

FREEMAN J. DYSON
Instituto de Estudios avanzados
Princeton, Nueva Jersey

I. LA OBRA DE BERNAL

El Mundo, la Carne y el Demonio; un examen sobre el futuro de los tres enemigos del alma racional es el título completo de la primera obra de Bernal, que escribió a la edad de veintiocho años. Cuarenta años después dijo en un prólogo a la segunda edición: «Esta obra breve fue la primera que escribí. Le tengo mucho apego porque contiene muchas semillas de ideas que he ido elaborando a lo largo de mi vida científica. Todavía pienso que conserva su validez propia.» Para Bernal, inválido e incapacitado en los últimos años de su vida, fue sin duda un consuelo saber que esta obra de la primavera de su vida era comprada y leída otra vez por una nueva generación de jóvenes lectores.

El libro de Bernal comienza con las siguientes palabras: «Hay dos futuros, el futuro del deseo y el futuro del destino, y la razón humana no ha aprendido nunca a separarlos.» No sé de otra frase inicial superior a ésta en una obra literaria escrita en inglés. La modesta afirmación de Bernal cuando dice que «conserva su validez propia» continúa siendo cierta, tanto en 1972 como en 1968. Se han producido cambios enormes desde que escribió el libro en 1929, tanto en la ciencia como en los asuntos humanos. Sería milagroso que los acontecimientos de los últimos cuarenta años no hubieran dejado anticuado o superado nada de lo escrito. Pero resulta sorprendente lo poco que ha resultado equivocado o marginal en relación a nuestras preocupaciones actuales.

Decidí que la mejor manera de honrar a Bernal en esta conferencia era utilizar su libro como punto de partida para mis propias especulaciones sobre el futuro de la humanidad. No voy a exponer ni a criticar detalladamente la obra. Confío que muchas de las cosas que diga serán frescas y avanzarán en direcciones que sobrepasen los horizontes de Bernal. Pero los oyentes que hayan leído a Bernal comprenderán que mis ideas han sido profundamente influidas por las suyas.

* Tercera conferencia sobre J. D. Bernal pronunciada en el Birkbeck College, Londres, el 16 de mayo de 1972. Impresa en tirada limitada por el Birkbeck College, 1972. Reimpresa con el amable permiso del rector del Birkbeck College.

Confío que quienes no hayan leído a Bernal se animen con mis palabras a hacerlo.

Bernal consideró el futuro como una lucha de la parte racional de la naturaleza humana contra tres enemigos. Llamó al primer enemigo el Mundo, es decir, la escasez de bienes materiales, el terreno inadecuado, el clima duro, el desierto, los pantanos y otros obstáculos físicos que condenan a la mayor parte de la humanidad a vivir en la pobreza. Llamó al segundo enemigo la Carne, es decir, los defectos de la fisiología del hombre que le exponen a la enfermedad, que nieblan la claridad de su mente y que finalmente le destruyen mediante una deterioración senil. Llamó al tercer enemigo el Demonio, es decir, las fuerzas irracionales de la naturaleza psicológica del hombre que deforman sus percepciones y le llevan equivocado, con esperanzas y temores locos, dominando la débil voz de la razón. Bernal tenía fe en que el alma racional del hombre prevalecería finalmente sobre estos enemigos. Pero no preveía una victoria barata ni fácil. Tenía esperanzas de derrotar al enemigo en cada una de las tres luchas únicamente si la humanidad estaba dispuesta a adoptar medidas muy radicales.

Las medidas radicales que Bernal prescribió eran las siguientes, brevemente resumidas. Para derrotar al Mundo, la mayor parte de la especie humana abandonará este planeta y se irá a vivir en colonias que flotarán libremente dispersas a través del espacio exterior. Para derrotar a la Carne, los humanos aprenderán a sustituir los órganos deficientes por órganos artificiales hasta que nos convirtamos en una simbiosis íntima de cerebro y máquina. Para derrotar al Demonio deberemos reorganizar primero la sociedad según líneas científicas y más tarde ejerceremos un control intelectual consciente sobre nuestros humores e impulsos emotivos, interviniendo directamente en las funciones afectivas de nuestros cerebros con medios técnicos todavía por descubrir. Este resumen es una basta simplificación de las ideas de Bernal. No imaginaba él que estos remedios proporcionaran una solución final para los problemas de la humanidad. Sabían muy bien que cada cambio en la situación humana crearía nuevos problemas y nuevos enemigos del alma racional. Se detuvo donde se detuvo porque no podía ver más allá. Su capítulo sobre la Carne finaliza con estas palabras: «Esto puede representar un final o un principio, pero lo que sigue queda fuera de nuestra visión.»

¿Qué parte de lo que Bernal no podía ver en 1929 podemos captar nosotros desde nuestro puesto de observación de 1972? La primera y más evidente diferencia entre 1929 y 1972 es que disponemos ahora de una oposición muy ruidosa y bien organizada contra todo posterior crecimiento del papel que desempeña la tecnología en los asuntos humanos. Los profetas sociales de hoy en día consideran a la tecnología como una fuerza destructiva y no liberadora. En 1972 no está nada de moda creer, como Bernal, que la colonización del espacio, el perfeccionamiento de los órganos artificiales y el dominio de la fisiología cerebral constituyen las claves para el futuro del hombre. Los jóvenes que están sintonizados con la postura de la época consideran al espacio como algo sin importancia, y creen que la ecología es la única rama de la ciencia éticamente respetable. Sin embargo, sería un error creer que las ideas de Bernal estaban más de acuerdo con las opiniones populares de 1929 que con las de 1972. Bernal no fue nunca una persona que se abandonara a la corriente. La tecnología era impopular en 1929 porque la gente la asociaba con el empleo del gas en la primera guerra mundial, tal como hoy en día es impopular por su asociación con Hiroshima y la defoliación del Vietnam. En 1929 la actitud de rechazo a la tecnología era menos notoria que hoy, pero no menos real. Bernal comprendió que sus propuestas para rehacer al hombre y la sociedad chocaban con instintos profundamente arraigados en el hombre. No por ello debilitó o comprometió sus afirmaciones. Creyó que un alma racional acabaría por aceptar su visión del futuro como algo razonable, y eso le bastaba. Previó que la humanidad podría dividirse en dos especies, una que seguiría el camino tecnológico que él describía, y otra que se aferraría lo mejor que pudiera a los antiguos sistemas populares de vida natural. Y reconocía que la dispersión de la humanidad en las vastedades del espacio es precisamente el requisito para que tenga lugar esta división de la especie sin luchas intolerables ni rupturas sociales. La perspectiva más amplia que hemos conseguido entre 1929 y 1972 sobre los efectos perniciosos de la tecnología afecta sólo a los detalles, pero no al núcleo del argumento de Bernal.

Otra diferencia conspicua entre 1929 y 1972 es que los hombres han visitado ya la Luna. Es sorprendente que este hecho afecta poco la plausibilidad de la visión del futuro de Bernal. Éste previó en 1929 una emigración barata y masiva de seres humanos fuera de la Tierra. No sabía los detalles de esa emigración. Todavía ignoramos nosotros cómo habrá que hacerlo. Es evidente que no se utilizarán las técnicas que llevaron al hombre a la Luna en 1969. Sabemos que en principio el coste energético o en combustible para transportar personas de la Tierra al espacio no tiene por qué superar al coste del transporte desde Nueva York a Londres. Pero traducir este «principio» en realidad exigirá dos cosas: primero, un gran avance en el diseño de aviones supersónicos, y, segundo, el crecimiento de un tráfico lo bastante masivo para poder aplicar grandes economías de escala. Es probable que el vehículo Apolo tenga la misma relación con los vehículos espaciales de transporte masivo y barato del futuro que los majestuosos aviones de 1930 guardan con el Boeing 747 de la actualidad. El avión R101 era absurdamente grande, bello, caro y frágil, exactamente como el Saturno 5 del programa Apolo. Si esta analogía es correcta, y ésa es mi opinión, dispondremos de transporte hacia el espacio a precio razonable dentro de unos cincuenta años a partir de ahora. Pero mis motivos para esta afirmación no son más sólidos que los de Bernal cuando creía lo mismo en 1929.

II. La doble hélice

El cambio decisivo que nos permite ver en 1972 más allá de lo que era posible en 1929 es el advenimiento de la biología molecular. Bernal reconoció este factor en su prólogo de 1968 a su libro, donde habla de la doble hélice como «la idea mayor y más general de toda la ciencia». Ahora comprendemos ya los principios básicos mediante los cuales las células vivientes se organizan y se reproducen. Quedan muchos misterios, pero es inevitable que llegaremos a comprender los procesos químicos de la vida con todo detalle, incluyendo los procesos de desarrollo y diferenciación en los organismos superiores, todo esto dentro del siglo próximo. Considero también como algo inevitable y deseable que aprendamos a explotar estos procesos en beneficio nuestro. En el siglo XXI se producirá el desarrollo de una tecnología completamente nueva a partir del dominio de los principios de la biología, del mismo modo que nuestra tecnología actual partió del dominio de los principios de la física.

La nueva tecnología biológica puede crecer en tres direcciones distintas. Probablemente se explorarán las tres y las tres darán fruto en aplicaciones concretas. La primera dirección es la que han discutido principalmente los biólogos que se sienten responsables ante las consecuencias humanas de su trabajo; la denominan «cirugía genética». La idea consiste en que podremos leer la secuencia base del ADN de un esperma u óvulo humano, pasar la secuencia por una computadora que identificará los genes o mutaciones nocivos y luego aplicará por micromanipulación genes inocuos dentro de la secuencia para sustituir a los dañinos. También será posible añadir al ADN genes que den diversas características deseadas al individuo resultante. Esta tecnología será difícil y peligrosa, y su utilización planteará problemas éticos graves. Jacques Monod en su obra reciente *El azar y la necesidad* barre toda idea de este tipo con su usual certidumbre dogmática. Se esperan de los avances actuales de la genética molecular «promesas ocasionales de remedios», dice. «Esta ilusión, difundida por algunas mentes superficiales, vale más darla de lado.» Aunque tenga un gran respeto por Jacques Monod, osaré desafiar su irritación afirmando mi fe en que la cirugía genética ha de tener una parte importante en el futuro del hombre. Pero comparto la opinión prevaleciente entre los biólogos de que debemos ir con mucho cuidado al interferirnos con el material genético humano. Las interacciones entre los miles de genes de una célula humana son tan exquisitamente complicadas que un programa de computadora que califique a los genes como «buenos» o «malos» sólo servirá para los tipos de defectos más bastos. Hay fuertes razones para declarar una moratoria sobre la cirugía genética durante los próximos cien años, o hasta que comprendamos la genética humana mucho mejor que ahora.

Dejando aparte la cirugía genética aplicada a las personas, preveo que el siglo próximo pondrá en nuestras manos dos formas más de tecnología biológica que son menos peligrosas, pero sí lo bastante revolucionarias para transformar las condiciones de nuestra existencia. Considero estas nuevas tecnologías como aliados poderosos para atacar a los tres enemigos de Bernal. Les doy los nombres de «ingeniería biológica» y «maquinaria autorreproductora». Ingeniería biológica significa la síntesis artificial de organismos vivos destinados a cumplir objetivos humanos. Maquinaria autorreproductora significa la imitación de la función y reproducción de un organismo vivo con materiales no vivientes: un programa de computadora que imite la función del ADN y una fábrica en miniatura que imite las funciones de las moléculas de proteína. Cuando hayamos conseguido una comprensión completa de los principios de organización y desarrollo de un organismo simple multicelular, se nos abrirán estas dos avenidas para su explotación tecnológica.

III. Ingeniería biológica

Yo espero que los triunfos más tempranos y menos controvertidos de la ingeniería biológica serán extensiones del arte de la fermentación industrial. Cuando podamos producir microorganismos dotados de sistemas enzimáticos hechos a la medida de nuestro propio diseño, podremos utilizar esos organismos para llevar a cabo operaciones químicas con una delicadeza y economía muy superiores a lo que permite la actual práctica industrial. Por ejemplo, las refinerías de petróleo contendrían una variedad de bichos destinados a metabolizar petróleo crudo y transformarlo en los estereoisómeros hidrocarbónicos precisos que se necesiten para varios propósitos. Un tanque contendría el bicho para un octanaje *n*, otro el bicho para el benceno, y así sucesivamente. Todos los bichos contendrían enzimas que metabolizarían el azufre y lo transformarían en su forma elemental de modo que quedaría completamente controlada la polución de la atmósfera con gases sulfurosos. El control y funcionamiento de tales tanques de fermentación a gran escala no sería fácil, pero los beneficios económicos y sociales son tan grandes que confío que llegaremos a aprender la manera de realizarlo. Cuando hayamos dominado la refinería de petróleo biológica, seguirán aplicaciones más importantes de los mismos principios. Tendremos fábricas que producirán biológicamente alimentos concretos a partir de materias primas baratas, y plantas de tratamiento de aguas residuales que convertirán eficientemente nuestros desechos en sólidos utilizables y agua pura. Para realizar estas operaciones necesitaremos todo un arsenal de muchas especies de microorganismos entrenados para ingerir y excretar las substancias químicas adecuadas. Y dentro del metabolismo de estos organismos diseñaremos la propiedad esencial de la autoliquidación, de modo que cuando les falte el alimento desaparezcan canibalizándose los unos a los otros. No harán como las bacterias que se alimentan de nuestras aguas residuales en la tecnología actual y dejan detrás sus

carcasas putrefactas, convertidas en un lodo sólo ligeramente menos perjudicial que la masa que se comieron.

Si estas expectativas se cumplen, el advenimiento de la tecnología biológica será de enorme utilidad en el establecimiento de unas estructuras de desarrollo industrial que permitan a los seres humanos vivir en la salud y el confort. Las refinerías de petróleo no tienen que heder. Los ríos no tienen que convertirse en cloacas. Sin embargo, hay muchos problemas del medio ambiente que no serán tocados por el uso de organismos artificiales en tanques cerrados. Por ejemplo, la destrucción del medio ambiente por la minería y por los coches abandonados no se reducirá construyendo fábricas más limpias. El segundo paso en ingeniería biológica, tras la fábrica biológica cerrada, es dejar que los organismos artificiales vayan sueltos por el medio ambiente. No hay duda de que este paso es más peligroso y problemático que el primero. El segundo paso tendría que darse solamente cuando se tenga una comprensión profunda de sus consecuencias ecológicas. Sin embargo, las ventajas que los organismos artificiales ofrecen en el dominio del medio ambiente son tan grandes que no es probable que nos abstengamos para siempre de su uso.

Las dos grandes funciones que los organismos artificiales prometen realizar para nosotros cuando los dejemos sueltos por la Tierra son las de minero y basurero. La belleza de un paisaje natural no perturbado por el hombre se debe en gran parte al hecho de que los organismos naturales en una ecología equilibrada son mineros y basureros excelentes. La minería corre a cargo principalmente de plantas y microorganismos que extraen minerales del agua, el aire y el suelo. Por ejemplo, se ha descubierto recientemente que los organismos en el suelo extraen amoniaco y monóxido de carbono del aire con una gran eficiencia. Debemos a los basureros el hecho de que en un bosque natural no se amontonen los pájaros muertos al mismo nivel que los coches en desuso de nuestros solares de despiece. Muchos de los peores atentados de los seres humanos contra la belleza natural se deben a nuestra incompetencia como mineros y basureros. Los organismos naturales saben cómo excavar y barrer efectivamente en un ambiente natural. En un ambiente creado por el hombre ni ellos ni nosotros sabemos cómo hacerlo. Pero no hay motivo para que no seamos capaces de diseñar organismos artificiales suficientemente adaptables para recoger nuestros materiales brutos y eliminar nuestros desechos en un ambiente que sea una mezcla cuidadosa de lo natural y lo artificial.

Un ejemplo simple de problema resoluble por un organismo artificial es el de la eutroficación de los lagos. En la actualidad muchos lagos se están arruinando por el crecimiento excesivo de algas que se alimentan con los niveles elevados de nitrógeno o de fósforo del agua. Podrían evitarse esos daños con un organismo que convirtiera el nitrógeno en su forma molecular o el fósforo en un sólido insoluble. Y como alternativa preferible podría diseñarse un organismo que desviara el nitrógeno y el fósforo en una cadena alimenticia que culminara en alguna especie de pez comestible. A largo plazo será

más factible controlar y aprovechar los recursos minerales del lago de este modo que manteniendo artificialmente un estado de esterilidad «natural».

Los organismos mineros artificiales no actuarían a la manera de los mineros humanos. Muchos se diseñarían para trabajar en el océano. Por ejemplo, las ostras podrían extraer oro del agua del mar y secretar perlas doradas. Una posibilidad menos poética, pero más práctica, es el coral artificial, que constituiría un arrecife rico en cobre o magnesio. Otros organismos mineros agujerearían como gusanos de tierra el lodo y la arcilla concentrando en sus cuerpos los minerales de aluminio o estaño o hierro, y excretando los minerales de algún modo conveniente para su recolección por el hombre. Casi todas las materias primas necesarias para nuestra existencia pueden extraerse del océano, del aire o de la arcilla, sin penetrar profundamente en la tierra. Cuando sea necesaria la minería convencional, los organismos artificiales pueden continuar siendo útiles para digerir y purificar el mineral.

No se necesita mucha imaginación para prever la efectividad de los organismos artificiales como barrenderos. Un microorganismo adecuado podría convertir el peligroso mercurio orgánico de nuestros ríos y lagos en un sólido insoluble inocuo. Podríamos aprovecharnos de un organismo que tuviera un apetito consumidor del cloruro de polivinilo y otros materiales plásticos similares que actualmente ensucian las playas de toda la Tierra. Podemos imaginar la producción de un animal diseñado concretamente para comerse automóviles en desuso. Pero uno confía que el automóvil en su forma actual habrá desaparecido antes que haya que incorporarlo en una cadena alimentaria artificial. Un papel más serio y permanente para los organismos basureros es la recogida de los vestigios de radiactividad del medio ambiente. Los tres elementos radiactivos más peligrosos producidos en los reactores de fisión son el estroncio, el cesio y el plutonio. Estos elementos tienen prolongadas semividas y serán emitidos inevitablemente en pequeñas cantidades mientras la humanidad utilice la fisión nuclear como fuente de energía. Los peligros a largo plazo de la energía nuclear se reducirían notablemente si tuviéramos organismos diseñados para engullir estos tres elementos del agua o del suelo y convertirlos en una forma indigerible. Por suerte ninguno de los tres elementos es esencial para nuestra química corporal y no nos perjudica hacerlos indigeribles.

IV. Grandes árboles

He hablado de los dos primeros pasos de la ingeniería biológica. El primero transformará nuestra industria y el segundo transformará nuestra ecología terrestre. Ha llegado el momento de hablar del tercer paso, que es la colonización del espacio. Creo que la ingeniería

biológica es de hecho la herramienta esencial que convertirá en una posibilidad práctica el sueño de Bernal sobre la expansión de la humanidad en el espacio.

Tengo que aclarar primeramente unos cuantos errores populares sobre el espacio como hábitat. Se considera en general que los planetas son importantes. Aparte de la Tierra, no lo son. Marte carece de agua, y los demás son básicamente y por diversas razones inhospitalarios para el hombre. Se considera generalmente que a partir de la familia de planetas del Sol se extiende un vacío absoluto que dura años-luz hasta llegar a otra estrella. De hecho es probable que el espacio situado alrededor del sistema solar esté poblado por un gran número de cometas, pequeños mundos de unas cuantas millas de diámetro, ricos en agua y en las demás sustancias químicas esenciales para la vida. Vemos uno de esos cometas únicamente cuando sufre una perturbación casual de su órbita que lo envía de cabeza cerca del Sol. Parece ser que la región próxima al Sol captura aproximadamente un cometa por año, y allí eventualmente se evapora y desintegra. Si suponemos que el suministro de cometas distantes es suficiente para mantener este proceso durante los miles de millones de años que ha existido el sistema solar, la cantidad total de cometas ligados eventualmente al Sol será de miles de millones. La superficie combinada de estos cometas es, entonces, mil o diez mil veces la de la Tierra. Deduzco de estos hechos que los cometas y no los planetas son el más importante hábitat potencial de la vida en el espacio. Si es cierto que las demás estrellas tienen tantos cometas como el Sol, se deduciría que los cometas ocupan toda la Galaxia. No disponemos de pruebas que apoyen o contradigan esta hipótesis. Si es cierta, implica que nuestra Galaxia es un lugar mucho más acogedor para los viajeros interestelares que de lo que hacía pensar su popularidad. La distancia media entre oasis habitables en el desierto del espacio no se mide en años-luz sino que es del orden de un día-luz, o menos.

Propongo, pues, una visión optimista de la Galaxia como morada de la vida. Ahí fuera hay incontables millones de cometas que poseen, en abundancia, agua, carbono y nitrógeno, los constituyentes básicos de las células vivientes. Cuando pasan cerca del Sol observamos que contienen todos los elementos comunes necesarios para nuestra existencia. Les faltan sólo dos requisitos esenciales para el asentamiento humano, a saber, calor y aire. Y ahora la ingeniería biológica acudirá a nuestra llamada. Aprenderemos a hacer crecer los árboles en los cometas.

Conseguir que un árbol crezca en el espacio sin aire mediante la luz de un Sol distante es básicamente un problema de rediseño de la piel de sus hojas. En todo organismo la piel es una parte crucial que hay que adecuar delicadamente a las demandas del medio ambiente. La piel de una hoja en el espacio ha de satisfacer cuatro requisitos. Ha de ser opaca a la radiación del ultravioleta lejano para proteger a los tejidos vitales de los daños de la radiación. Ha de ser impermeable al agua. Ha de transmitir luz visible a los órganos de fotosíntesis. Ha de tener una emisividad para la radiación del infrarrojo lejano muy

baja, de modo que pueda limitar la pérdida de calor y evitar la congelación. Un árbol cuyas hojas posean una piel así podría arraigar y florecer sobre cualquier cometa situado tan cerca del Sol como las órbitas de Júpiter y de Saturno. Más allá de Saturno la luz solar es demasiado débil para conservar el calor de una hoja simple, pero los árboles pueden crecer a distancias mucho mayores si se dotan de hojas compuestas. Una hoja compuesta consistiría en una parte fotosintética capaz de conservar su propio calor, junto con una parte en forma de espejo convexo que se conservaría fría, pero enfocaría luz solar concentrada sobre la parte fotosintética. Sería posible programar las instrucciones genéticas de un árbol para producir hojas así y orientarlas correctamente hacia el Sol. Muchas plantas existentes poseen estructuras más complicadas que esto.

Una vez que se haya conseguido que las hojas funcionen en el espacio, las partes restantes de un árbol –tronco, ramas y raíces– no presentan grandes problemas. Las ramas no se han de congelar, y por lo tanto la corteza ha de ser un aislante térmico superior. Las raíces penetrarán y fundirán gradualmente el interior congelado del planeta, y el árbol construirá su propia substancia a partir de los materiales que las raíces encuentren allí. El oxígeno que las hojas elaboren no se ha de exhalar hacia el espacio; habrá que transportarlo hasta las raíces y soltarlo en las regiones donde los hombres vivirán y tendrán su esparcimiento entre los troncos de los árboles. Queda por contestar una cuestión. ¿A qué altura puede crecer un árbol en un cometa? La respuesta es sorprendente. En cualquier cuerpo celestial con un diámetro del orden de diez millas o menos, la fuerza de la gravedad es tan débil que un árbol puede crecer a una altura infinita. La madera ordinaria es lo bastante fuerte para levantar su propio peso a una distancia arbitraria del centro de gravedad. Eso significa que a partir de un cometa de diez millas de diámetro, los árboles pueden crecer a centenares de millas, recogiendo la energía de la luz solar sobre una superficie miles de veces superior a la superficie del mismo planeta. Visto desde muy lejos, el cometa parecerá una pequeña patata de la que brotará una inmensa espesura de tallos y follaje. Cuando el hombre vaya a vivir a los cometas, se encontrará devuelto a la existencia arbórea de sus antepasados.

Llevaremos a los cometas no sólo árboles sino también una gran variedad de flora y fauna para crearnos un medio ambiente tan bello como el que haya existido nunca en la Tierra. Quizá enseñaremos a nuestras plantas a hacer semillas que navegarán a través del océano del espacio para propagar la vida en cometas que el hombre no haya visitado todavía. Quizá pongamos en marcha una onda de vida que se propague de cometa en cometa hasta que logremos que la Galaxia florezca. Eso puede significar un final o un principio, como dijo Bernal, pero a partir de ahí queda lejos de nuestro alcance.

V. Maquinaria autorreproductora

De modo paralelo a la explotación de la ingeniería biológica podemos conseguir una revolución industrial igualmente profunda siguiendo el camino alternativo de la maquinaria autorreproductora. Las máquinas autorreproductoras son aparatos que tienen las capacidades multiplicadoras y autoorganizadoras de los organismos vivientes pero que están construidos de metal y de computadoras en lugar de protoplasma y de cerebros. Fue el matemático John von Neumann quien demostró por primera vez que las máquinas autorreproductoras son teóricamente posibles y esbozó los principios lógicos en que se basaría su construcción. Los componentes básicos de una máquina autorreproductora son precisamente análogos a los de una célula viviente. La separación de funciones entre el material genético (ADN) y la maquinaria enzimática (proteína) en una célula corresponde exactamente a la separación entre *software* (programas de computadora) y *hardware* (herramientas mecánicas) en una máquina autorreproductora.

Supongo que en el próximo siglo, en parte imitando los procesos de la vida y en parte mejorándolos, aprenderemos a construir máquinas autorreproductoras programadas para multiplicar, diferenciar y coordinar sus actividades con tanta habilidad como las células de un organismo superior, como un pájaro. Cuando hayamos construido una sola máquina huevo y le demos el programa de computadora adecuado, el huevo y su progenie crecerán dando un complejo industrial capaz de llevar a cabo tareas económicas de muy variada magnitud. Podrá construir ciudades, plantar huertos, construir instalaciones para generar energía eléctrica, lanzar vehículos espaciales, o criar gallinas. Los programas generales y su ejecución continuarán siempre bajo control humano.

Los efectos de una tecnología tan potente y versátil sobre los asuntos humanos son difíciles de prever. Si se utiliza de modo irrazonable representa una vía rápida hacia el desastre ecológico. Si se utiliza razonablemente representa un alivio rápido de todas las dificultades puramente económicas de la humanidad. Ofrece tanto a las naciones pobres como a las ricas una tasa de crecimiento de los recursos económicos tan rápida que las limitaciones económicas ya no serán el factor dominante que determinará cómo ha de vivir la gente. En cierto sentido esa tecnología constituirá una solución permanente de los problemas económicos del hombre. Como sucedió en el pasado, cuando los problemas económicos dejen de ser urgentes no nos faltarán nuevos problemas para sustituirlos.

Podría ser muy bien que en la Tierra, por razones estéticas o ecológicas, el uso de máquinas autorreproductoras esté estrictamente limitado y se recurra en cambio a la ingeniería biológica siempre que la alternativa sea factible. Por ejemplo, las máquinas autorreproductoras podrían proliferar en los océanos y cosechar minerales para uso del hombre, pero podríamos preferir que realizaran la tarea más

silenciosamente los corales y las ostras. Si las necesidades económicas no fuesen el factor principal podríamos permitirnos una pérdida de eficiencia en bien de un medio ambiente armonioso. Es posible, pues, que las máquinas autorreproductoras tengan en la Tierra un papel subalterno y discreto.

El reino auténtico de la maquinaria autorreproductora será el de las regiones del sistema solar inhóspitas para el hombre. Las máquinas construidas a base de hierro, aluminio y silicio no necesitan agua. Pueden florecer y proliferar en la Luna o en Marte, o entre los asteroides, llevando a cabo gigantescos proyectos industriales sin riesgo para la ecología de la Tierra. Se alimentarán de luz solar y de rocas, y no necesitarán más materias primas para su construcción. Construirán en el espacio las ciudades flotando libremente imaginadas por Bernal como habitación humana. Traerán océanos de agua de los satélites de los planetas exteriores, donde existe en abundancia, a las partes interiores del sistema solar donde se tiene necesidad de ella. Al final, esa agua hará incluso que florezcan los desiertos de Marte y los hombres se pasearán allí a cielo abierto respirando un aire como el aire de la Tierra.

Adentrándome mucho en el futuro preveo una división del sistema solar en dos dominios. El dominio interior, donde la luz solar es abundante y el agua escasa, será el dominio de las grandes máquinas y de las empresas del gobierno. Las máquinas autorreproductoras serán esclavas obedientes, y los hombres estarán organizados en gigantescas burocracias. Fuera y más allá de la zona iluminada por el Sol se extenderán los dominios exteriores, donde el agua es abundante y la luz solar escasa. En el dominio exterior están los cometas donde hombres y árboles vivirán en comunidades más pequeñas aisladas una de la otra por grandes distancias. Los hombres descubrirán el mundo salvaje que han perdido en la Tierra. Grupos de gente tendrán libertad para vivir como les plazca, con independencia de las autoridades gubernamentales. Fuera y lejos del Sol, podrán vagar para siempre por la frontera abierta que ya no posee este planeta.

VI. Demonios y peregrinos

He hablado mucho de cómo tratar con el Mundo y la Carne, pero no he dicho nada sobre la manera de tratar al Demonio. Bernal tuvo también dificultades con el Demonio. Admitió en el prólogo de 1968 a su obra que el capítulo sobre el Demonio era la parte menos satisfactoria. El Demonio descubrirá siempre nuevas variedades de la locura humana para frustrar nuestros sueños demasiado racionales.

En lugar de pretender que dispongo de un antídoto contra los ardides del Demonio, finalizaré esta conferencia con una discusión de los factores humanos que entorpecen de modo más evidente la realización de los grandes designios que acabo de describir. Cuando la

humanidad se enfrenta con la oportunidad de embarcarse en cualquier gran empresa, siempre hay tres factores humanos principales que estorban diabólicamente nuestros esfuerzos. El primero es la incapacidad para definir o ponerse de acuerdo sobre nuestros objetivos. El segundo es la incapacidad para recoger fondos suficientes. El tercero es el temor a un fallo desastroso. Estos tres factores han acosado de modo prominente el programa espacial de los Estados Unidos en los últimos años. Es una notable demostración de la vitalidad del programa que estos factores no hayan conseguido detenerlo. Cuando estemos ante las empresas mucho mayores de la tecnología biológica y de la colonización del espacio que nos aguardan en lo futuro, no hay duda de que los mismos tres factores aparecerán de nuevo para confundirnos y retrasarnos.

Quiero demostrarles ahora, mediante un ejemplo histórico, cómo pueden superarse esos factores humanos. Voy a citar a William Bradford, uno de los *pilgrim fathers,* que escribió un libro titulado *Sobre la plantación de Plimoth,* que describía la historia del primer asentamiento inglés en Massachusetts. Bradford fue gobernador de la colonia de Plymouth durante veintiocho años. Empezó a escribir su historia diez años después del establecimiento. Su objetivo al escribir era como dijo: «Que sus hijos puedan ver las dificultades contra las que sus padres lucharon al pasar por estas situaciones en sus primeros inicios. Como también que pueda servir para empleos de igual importancia en tiempos posteriores.» La obra de Bradford permaneció sin publicar durante doscientos años, pero nunca dudó de que estaba escribiendo para las edades que seguirían.

He aquí la descripción de Bradford sobre el problema de la incapacidad humana para ponerse de acuerdo sobre objetivos. La fecha es «la primavera de 1620», el mismo año en que tenían que hacerse a la mar los *pilgrim fathers:*

> Pero, como sucede en todos los asuntos, lo más difícil es la parte de actuación, especialmente cuando han de concurrir en la labor muchos agentes y también pasó aquí lo propio. Porque algunos de los que deberían haber ido desde Inglaterra se separaron y no quisieron ir; otros mercaderes y amigos que se habían ofrecido a arriesgar su dinero, se retiraron y presentaron muchas excusas; a algunos les desagradaba no ir a Guayana; otros, por su parte, no querían arriesgar nada si no iban a Virginia. Otros, en cambio (aquellos en los que más se confiaba), le cogieron un gran desagrado a Virginia y no querían hacer nada si iban allí. En medio de esta confusión los de Leyden, que habían puesto a contribución sus fincas y contribuido con su dinero, quedaron en situación muy apurada, temiendo lo que de todo aquello podía resultar.

La siguiente cita trata del problema perenne de los fondos. Aquí Bradford cita una carta escrita por Robert Cushman, el hombre responsable de la compra de provisiones para el viaje de los emigrantes. Escribe desde Dartmouth el 17 de agosto de 1620, en una época del año desesperadamente atrasada, meses después de la prevista fecha de partida de los barcos.

> Y el señor Martin dijo que nunca había recibido dinero en esas condiciones, que no quedó en deuda con los mercaderes ni por un clavo, que eran sanguijuelas y no sé qué más. Era un hombre sencillo, que de hecho no había puesto nunca ninguna condición a los mercaderes, ni siquiera habló con ellos. Pero ¿voló todo aquel dinero a Hampton, o era el suyo? ¿Quién es capaz de ir y depositar el dinero tan precipitada y pródigamente como él hizo sin ni saber qué sacaba de él ni en qué condiciones? En segundo lugar, le comuniqué los cambios hace mucho tiempo y él estuvo de acuerdo, pero ahora me tiraniza y dice que yo los he traicionado y entregado en manos de esclavos; que no está en deuda con ellos y él mismo puede aparejar dos buques y partir. ¿Cuándo, buen hombre? Sólo tiene cincuenta libras y si renunciara a sus cuentas no dispondría ni de un penique, de eso estoy seguro. Amigo, si conseguimos establecer una plantación, Dios habrá hecho un milagro, especialmente si tenemos en cuenta lo escasos que vamos de vituallas, y sobre todo con poca unión entre nosotros y huérfanos de buenos tutores y de buen regimiento.

Mi última cita describe el miedo al desastre, tal como aparece en el debate de los *pilgrim fathers* sobre su decisión original de ir a América.

> Otros, por su parte, empujados por sus temores, pusieron objeciones y trataron de apartarnos de ello; alegaban muchos motivos, motivos ni irrazonables ni improbables; porque se trataba de una gran empresa, sujeta a muchos peligros y azares inconcebibles; porque, además de las bajas del mar (de las que nadie puede librarse), la duración del viaje era tal que los cuerpos débiles de las mujeres y de otras personas agotadas por la edad y el trabajo (como les sucedía a muchos) no podrían nunca resistir. Y si a pesar de todo resistían, las miserias del país al cual tendrían que verse expuestos serían demasiado duras de soportar, y probablemente los consumirían y arruinarían totalmente, a algunos o a todos juntos. Porque allí estarían expuestos al hambre y a la desnudez y a la falta, en cierto modo, de todo. El cambio de aire, la dieta, el agua que beberían, infectaría sus cuerpos con graves dolencias y terribles enfermedades. Y los que escaparan o superaran esas dificultades, se verían expuestos continuamente al peligro de los salvajes, que son crueles, bárbaros y muy traicioneros, porque su rabia es de lo más furioso y no perdonan cuando ganan; no les basta matar y tomar la vida, sino que disfrutan atormentando a las personas del modo más sanguinario posible.

Podría continuar citando a Bradford durante horas, pero no es éste lugar para hacerlo. ¿Qué podemos aprender de él? Aprendemos que los tres demonios de la desunión, de la escasez de fondos, y del miedo a lo desconocido no son desconocidos de la humanidad. Han estado siempre con nosotros y estarán siempre con nosotros cada vez que se intenten grandes aventuras. También de Bradford aprendemos cómo hay que vencerlos. Los *pilgrim fathers* no recurrieron a la magia tecnológica para derrotarlos. Su victoria exigió todo el conjunto de virtudes de que son capaces los seres humanos en una situación extrema: dureza, valentía, altruismo, previsión, sentido común y buen humor. Bradford habría encabezado esta lista con la virtud que él consideraba más importante: la fe en la Divina Providencia.

Finalizo este trabajo con una nota de desacuerdo con Bernal. Bernal creía que derrotaremos al Demonio mediante una combinación de organización socialista y psicología aplicada. Creo que nuestra mejor defensa consistirá en confiar en las cualidades humanas que se han conservado sin alteración desde la época de Bradford hasta nuestros días. Si somos prudentes, conservaremos intactas estas cualidades de la especie humana a través de los siglos que vengan, y nos permitirá superar de modo seguro muchas crisis de destino que sin duda nos aguardan. Pero quiero que Bernal tenga la última palabra. La última palabra de Bernal es una cuestión que William Bradford debió ponderar mucho, pero que no habría sabido cómo contestar cuando contemplaba desviarse del camino de sus padres a la primera generación nacida en Nueva Inglaterra.

> Nos enfrentamos todavía tímidamente con el futuro, pero por primera vez lo percibimos en función de nuestra propia acción. Visto esto, ¿nos apartaremos de algo que ofende a la misma naturaleza de nuestros anteriores deseos o será el reconocimiento de nuestros nuevos poderes suficiente para cambiar estos deseos al servicio del futuro que tendrán que engendrar?

APÉNDICE E

OBSERVACIONES INFRARROJAS Y CIVILIZACIONES DE DYSON

MARTIN HARWIT
Centro de Radiofísica y de Investigación espacial
Universidad de Cornell, Ithaca, Nueva York

Hace algunos años, Sagan y Walker (1966) sugirieron la búsqueda de civilizaciones de Dyson (1960) a base en la emisión infrarroja procedente de un extenso caparazón habitado. En un caparazón mantenido a cerca de 300° K, el pico de emisión estará situado en el intervalo de los 10 micrones suponiendo que el espectro sea aproximadamente térmico.

Se dispone ahora de datos procedentes de cuatro tipos de observaciones:

1. Humphreys, Strecker y Ney (1971) han descubierto que seis supergigantes luminosas G tienen caparazones de emisión circumestelar cuyo espectro presenta un pico en la región de los 10 micrones. Sin embargo, la emisión fraccional en la parte de longitudes de onda largas del espectro, no suma más que unos cuantos por ciento. Los autores creen que la emisión infrarroja es producida por granos de silicato circumestelares.

Otros objetos estelares, muchos de los cuales fueron sacados a la luz por el «Estudio del Cielo en los 2 micrones», de Neugebauer y Leighton (1969), son mucho más débiles en la parte visual del espectro, pero emiten fuertemente en las longitudes de onda infrarroja. Se suele creer que muchos de estos objetos son supergigantes finales M, muy oscurecidos por polvo interestelar.

2. Cierto número de objetos brillantes infrarrojos están asociados con las regiones HII. En muchos casos la región HII es muy compacta y presenta fuertes oscurecimientos de polvo. No se observa radiación visual, pero estos objetos están caracterizados por una fuerte emisión térmica de radio. Parece ser que la radiación Ly-α emitida por las estrellas centrales ionizantes es absorbida por polvo distribuido dentro o alrededor de la región HII y la energía es reemitida en el infrarrojo. Ney y Allen (1969) y Harper y Low (1971) discuten esta clase de objetos.

3. La emisión total de las galaxias podría considerarse que proporciona por lo menos un límite superior al número de civilizaciones Dyson. Sin embargo, estos límites superiores son muy elevados en las galaxias lo bastante brillantes para proporcionar datos de confianza: M82, algunas galaxias Seyfert, etc. Tales objetos brillantes pueden

emitir más radiación en el infrarrojo que en todas las demás regiones de longitud de onda combinadas (Kleinmann y Low, 1970).

4. Las mediciones de la radiación de fondo en nuestra propia Galaxia pueden proporcionar un límite superior al número total de civilizaciones de Dyson; pero este límite es también muy elevado. La radiación difusa de fondo en los 10 micrones, medida a partir de cohetes, está dominada probablemente por la emisión térmica del polvo interplanetario. Es probable que esta circunstancia se mantenga incluso en direcciones muy alejadas del plano de la eclíptica. Las señales mínimas observadas (Soifer, Houck y Harwit, 1971) son comparables y algo superiores al brillo del cielo nocturno producido por la luz estelar integrada, en la parte visual del espectro.

En resumen, la emisión infrarroja puede constituir una característica que permita reconocer las civilizaciones de Dyson, pero habrá que formular otros criterios si se quiere que una investigación distinga estas civilizaciones de los objetos astronómicos que se presentan de modo natural en el infrarrojo.

REFERENCIAS

DYSON, F. J. (1960), «Search for Artificial Stellar Source of Infrared Radiation, *Science* 131: 1 667

HARPER, D. A. y F. J. LOW (1971), «Far Infrared Emission from HII Regions», *Astrophysical Journal* 165: L9-L14

HUMPHREYS, R. M., D. W. STRECKER, y E. P. NEY (1971), «High-Luminosity G Supergiants, *Astrophysical Journal* 167:L35-L40

KLEINMANN, D. E., y F. J. LOW (1970), «Observations of Infrared Galaxies», *Astrophysical Journal* 159: L165.

NEUGEBAUER, G., y R. B. LEIGHTON (1969), *Two-Micron Sky Surve (A Preliminary Catalogue)*, NASA SP-3047, Washington, D.C.

NEY, E. P., y D. A. ALLEN (1960) «The Infrared Sources in the Trapezium Region of M42, *Astrophysical Journal* 155: L193-L196.

SAGAN, C., y R. G. WALKER (1966), «The Infrared Detectability of Dyson Civilizations, *Astrophysical Journal* 144: 1 216-1 217.

SOIFER, B. T., J. R. HOUCK y M. HARWIT (1971), «Rocker Infrared Observations of the Interplanetary Medium», *Astrophysical Journal* 168: L73.

APÉNDICE F

LA BÚSQUEDA DE GODot

JOSHUA LEDERBERG
Departamento de Genética, Escuela de Medicina
Universidad de Stanford, Stanford, California

Supongo (1) que los ángeles están todavía dentro de la Galaxia, y (2) que la mejor manera de estimar su «progreso» medio es suponerlo igual al nuestro ± milenios.

Por lo tanto, una razonable proporción de ellos habrá alcanzado el estadio del viaje interestelar (prudentemente «no tripulado»), pero sin ser capaces de discriminar la Tierra de entre la multitud. (Los visionarios de OVNIS son increíblemente geocéntricos en su engreimiento.)

Ergo, si hay un transmisor, estará situado en el punto único de la Galaxia, y, por lo que puedo imaginar, este punto es el *baricentro*. Eso resultará todavía más evidente para el subconjunto de ángeles que viven a unos cuantos centenares o miles de años-luz del centro. A propósito, ¿dispondrán de más polvo interestelar como «combustible» para sus cohetes?

Además yo favorecería buscar las señales en el dominio de frecuencias, en lugar de explotar el promedio temporal. El programa operativo consistiría en buscar estructuras de líneas inesperadas sobrepuestas a las líneas ensanchadas por efecto doppler; por ejemplo, la emisión de microondas del H en 21 cm. Que de todos modos tenemos buenos motivos para estudiar.

Pero si uno se toma en serio estos programas, tenemos que tener también en cuenta los imperativos políticos que obligan a establecer un *silencio de radio* terrestre en relación con las emisiones que podrían detectarse en otras partes.

APÉNDICE G

NÚMERO DE BITS EN TAQUIONES

MARTIN HARWIT
Centro de Radiofísica e Investigación Espacial
Universidad de Cornell, Ithaca, Nueva York

Continúa discutiéndose si los taquiones podrían utilizarse para la comunicación entre civilizaciones avanzadas. Unos cuantos argumentos de causalidad han sugerido que quizá los taquiones ni existan. Sin embargo, hasta que se resuelva esta cuestión, vale la pena preguntarse qué número de bits podría alcanzar la comunicación con taquiones y qué valor presenta comparado con la transmisión mediante el uso de ondas electromagnéticas.

Suponemos que los argumentos del espacio de fases determinan la discernibilidad de los taquiones y el número de taquiones discernibles transmitidos por unidad de tiempo determina el número de bits. Para un receptor con una superficie A y un ángulo sólido de recepción Ω, el volumen del cual se reciben taquiones por unidad de tiempo es ANc, donde N es la velocidad de los taquiones medida en unidades y c, la velocidad de la luz. El volumen del espacio de momento ocupado por estos taquiones es $\Omega p^2 dp$, por modo de polarización. El número de taquiones discernibles que inciden sobre el detector en el tiempo unidad (referido aquí al número de taquiones) sería, por lo tanto,

$$\left|\frac{ANc\Omega p^2\,dp}{h^3}\right|. \tag{1}$$

Utilizamos la expresión relativista

$$\epsilon^2 = p^2c^2 + m^2c^4 = m^2c^4(1 - N^2)^{-1} \tag{2}$$

que relaciona la energía ε y la masa en reposo m con el momento y la velocidad. Esto conduce al valor (imaginario) del momento

$$p = \frac{N}{\sqrt{1 - N^2}}\,mc \tag{3}$$

y la expresión (1) obtenida para un intervalo de velocidad dNc se lee

$$\left|\frac{A\Omega}{h^3}\,m^3c^4\,\frac{dN}{N^3}\right| \quad \text{para } N \gg 1. \tag{4}$$

La expresión correspondiente para la radiación electromagnética es

$$\frac{A\Omega\nu^2\,d\nu}{c^2}, \tag{5}$$

donde $d\nu$ es la frecuencia de la radiación. Si suponemos que la frecuencia es la de la luz visible, que m es la masa de un electrón, el número de bits en taquiones resulta ser muchos órdenes de magnitud mayor que el número de bits electromagnéticos, siempre que N se mantenga inferior aproximadamente a 10^7 y $dN/N \sim d\nu/\nu$. Con esta velocidad la energía por taquión sería aproximadamente $10^{-7}\,mc^2$ correspondiente a unos 0,1 electrón-voltios mientras que la radiación visual exigiría una energía de transmisión aproximadamente de un orden de magnitud superior.

Si $N \sim 10^8$, el número de bits y el gasto de energía por mensaje son comparables al de la luz visible, pero se pueden conseguir comunicaciones a través del universo en tiempos del orden de los 100 años.

Un aumento en la velocidad de los taquiones aumenta la velocidad de transmisión, pero disminuye el número de bits. Por lo tanto, los mensajes con un bajo contenido informativo pueden transmitirse muy rápidamente.

Hay que tener en cuenta, finalmente, que se plantea una cuestión fundamental sobre la interrelación entre taquiones y nuestra definición de los horizontes cósmicos. Es evidente que conceptos corrientes como partícula, acontecimiento, y horizontes absolutos carecen de un significado fundamental si se pueden transmitir mensajes taquiónicos a través de horizontes que existen solamente para los fotones y la materia ordinaria.

APÉNDICE H

PULSOS DE RAYOS X PARA LA COMUNICACIÓN INTERESTELAR

JAMES L. ELLIOT
Laboratorio de Estudios Planetarios
Universidad de Cornell, Ithaca, Nueva York

Los rayos X no son adecuados para transmitir una corriente continua de información a causa de su elevado ruido cuántico. Pero los rayos X presentan algunas ventajas importantes como medio para enviar y recibir el importantísimo primer bit, el anuncio del mensaje.

Una ventaja es que ya hemos utilizado rayos X para enviar señales. Estas señales fueron enviadas en el curso de varias explosiones nucleares. Cuando estalla un arma nuclear, un 70 por ciento de la energía liberada lo es en forma de rayos X del orden del kilovoltio, y este pulso de rayos X se forma en menos de un microsegundo (Westervelt y Hoerlin, 1965). Si la explosión se produce por encima de los 80 km, los rayos X no son absorbidos por la atmósfera y pueden propagarse por el espacio. Estados Unidos ha llevado a cabo por lo menos cinco pruebas a gran altura, dos de las cuales tenían potencias del orden del megatón (Westervelt y Hoerlin, 1965; Brown, Hess y Van Allen, 1963; Van Allen, McIlwain y Ludwig, 1959). Suponiendo que la Unión Soviética haya probado un número semejante de bombas nucleares a gran altura, podemos estimar que nuestro planeta ha enviado unos diez pulsos potentes de rayos X hacia el espacio exterior.

Otras ventajas de utilizar el pulso de rayos X generado por una explosión nuclear a gran altura a fin de establecer comunicaciones iniciales son las siguientes: *a)* el pulso es corto y no resultará ensanchado o atenuado apreciablemente por la propagación a través del medio interestelar; *b)* el receptor no ha de satisfacer exigencias estrictas, porque el pulso cubre un ancho espectro de rayos X; y *c)* el flujo de rayos X provocado es mucho mayor que el del Sol, una fuente local de rayos X de fondo.

El Sol inactivo, en el tiempo en microsegundos de una explosión nuclear produce unos 9×10^{17} ergios de rayos X en el intervalo de 1 a 10 kiloelectrón-voltios (Neupert, 1969). Sin embargo, la bomba de 1,4 megatones que hizo explotar Estados Unidos en la prueba Starfish dio unos 3×10^{22} ergios de rayos X de 1 a 10 kiloelectrón-voltios. Incluso una gran erupción solar emitiría en un microsegundo menos de una centésima parte de la energía de rayos X emitida por la bomba Starfish. Hay que tener también en cuenta que la variación en el tiempo de una erupción solar sigue una escala muy superior al microsegundo.

Hay dos factores limitantes en la detección de pulsos de rayos X nucleares a grandes distancias. Primeramente tenemos que recibir en el detector fotones suficientes para definir un «pulso», y este número ha de ser muchas veces superior a la fluctuación estadística en el flujo de fondo de los rayos X cósmicos. El flujo de fondo es de unos 12 fotones por centímetro cuadrado por segundo por estereorradián en el intervalo de 1 a 10 kiloelectrón-voltios (Giacconi, Gursky y Van Speybroeck, 1968).

Si suponemos que las fluctuaciones en el fondo de rayos X siguen la estadística de Poisson, podemos derivar una fórmula para la distancia máxima d (en años-luz), a la cual puede detectarse un pulso de rayos X procedente de una explosión nuclear. Vamos a suponer que la bomba tiene una potencia de E megatones (1 megatón = 4×10^{22} ergios), y que el 50 por ciento de esta energía se transforma en rayos X de 1 a 10 electrón-voltios, en forma de un pulso de 1 microsegundo de duración. La energía media de los fotones de rayos X producidos es aproximadamente igual a 2 kiloelectrón-voltios. Además suponemos que existe un método para canalizar una gran fracción η de este pulso de rayos X dentro de un ángulo sólido Ω_b. Esto intensificaría el pulso de rayos X emitido en ciertas direcciones a costa de la capacidad de emitir señales simultáneamente en todas direcciones.

Para detectar el pulso de rayos X podemos utilizar un contador proporcional a bordo de un satélite con una eficiencia del 80 por ciento en la detección de rayos X situados en la región de 1 a 10 kiloelectrón-voltios (Giaconni, Gursky y Van Speybroeck, 1968). El ángulo sólido visto por el detector es Ω (estereorradianes) y su área es A (centímetros cuadrados). Para tener menos de una falsa alarma por año (causada por el fondo de rayos X), es preciso que el pulso de rayos X sea por lo menos 15 veces la fluctuación cuadrática mínima del número de fotones de fondo detectados en un microsegundo. Estas suposiciones conducen a la siguiente ecuación para d:

$$d = 2{,}9 \times 10^{-3} \left\{ EA \frac{4\pi\eta}{\Omega_b} \right\}^{1/2} (A\Omega)^{-1/4} \text{ años-luz} \qquad (1)$$

Además del criterio entre señal y ruido en la ecuación (1), vamos a exigir también la detección de por lo menos 15 rayos X del pulso. Esta exigencia conduce a la siguiente desigualdad

$$d \leq 1{,}9 \times 10^{-4} \left\{ EA \frac{4\pi\eta}{\Omega_b} \right\}^{1/2} \text{ años-luz} \qquad (2)$$

que puede rebajar el valor de d obtenido de la ecuación (1).

Podemos calcular ahora la distancia a la cual podría observarse la explosión Starfish con los detectores de rayos X actualmente en uso. Un contador proporcional típico, sensible a la región de los rayos X blandos, podría tener una superficie de 1 000 centímetros cuadrados y un campo de visión de $5^o \times 5^o$. Aplicando E = 1,4 megatones y suponiendo que el pulso de rayos X es i_ualmente intenso en todas

direcciones vemos que la ecuación (2) da $d \approx 400$ unidades astronómicas –unas diez veces el radio de la órbita de Plutón.

Si Estados Unidos y la URSS reunieran sus arsenales nucleares para producir una única y gran explosión (¡muy lejos de la Tierra!), el pulso podría detectarse a considerable distancia. Vamos a hacer una conjetura disparatada y supondremos que cada superpotencia tiene un arsenal de 10^4 megatones ($E = 2 \times 10^4$ megatones). Suponemos también que el pulso de rayos X puede concentrarse dentro de un rayo cónico de unos 30º de ángulo sin pérdida de rayos X. El detector tendrá $A = 10^4$ centímetros cuadrados y $\Omega = 0{,}08$ estereorradianes. En este caso la ecuación (1) da $d = 190$ años-luz –una distancia respetable para el envío de una señal que cubre un ángulo sólido relativamente grande.

Podría llevarse a cabo una búsqueda de señales interestelares en forma de pulsos de rayos X de microsegundos conjuntamente con observaciones astronómicas de rayos X. Puesto que muchas fuentes galácticas de rayos X presentan grandes fluctuaciones en escalas temporales cortas, una resolución de milisegundos es un rasgo corriente de la mayoría de experimentos con rayos X. En principio no sería difícil ampliar la resolución temporal de estos sistemas de detección hasta tiempos del orden del microsegundo, y estudiar el tiempo y la dirección de llegada de todos los pulsos de microsegundo insólitamente grandes. La búsqueda de pulsos de microsegundos podría efectuarse al mismo tiempo que el detector funcionara para otras observaciones astronómicas de rayos X.

REFERENCIAS

BROWN, W. L., W. N. HESS y J. A. VAN ALLEN (1963), Collected Papers on the Artificial Radiation Belt from the July 9, 1962, Nuclear Detonation, Introduction. *Journal of Geophysical Research* 68.

GIACCONI, R., H. GURSKY y L. P. VAN SPEYBROECK (1968), «Observational Techniques of X-Ray Astronomy», *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 6.

NEUPERT, W. M. (1969). X Rays from the Sun, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 7.

VAN ALLEN, J. A., C. E. MCILWAIN y G. H. LUDWIG (1959), «Satellite Observations of Electrons Artificially Injected into the Geomagnetic Field», *Journal of Geophysical Research* 64.

WESTERVELT, D. R. y H. HOERLIN (1965), «The Los Alamos Air Fluorescence Detection System», *Proceedings of the IEEE* 53.

GLOSARIO ELEMENTAL

Abiológico

Con ausencia de vida.

Análisis de Fourier

Descomposición de una señal en un conjunto de curvas armónicas sencillas (senos o cosenos) de amplitud y fase adecuadas.

Anisotrópico

No isotrópico; concentrado en alguna dirección o direcciones determinadas.

Año-luz

La distancia que recorre la luz en un año yendo a 300 000 kilómetros por segundo. Es casi diez millones de millones de kilómetros o casi 10^{18} centímetros.

Astrometría

Medición precisa de las posiciones y movimientos de las estrellas.

Bit

La mínima unidad posible de información; es esencialmente una respuesta de sí o de no a una pregunta dada.

CETI

Acrónimo, inventado para este congreso, que corresponde a Comunicación con Inteligencias extraterrestres.

Cibernética

El estudio de los procesos de control de máquinas; en sentido amplio, el diseño de una inteligencia artificial.

Civilización de tipo I

Una civilización capaz de utilizar el equivalente de la producción actual de energía de la civilización terrestre para la comunicación interestelar.

Civilización de tipo II

Una civilización capaz de utilizar el equivalente de la producción de energía del Sol para la comunicación interestelar.

Civilización de tipo III

Una civilización capaz de utilizar el equivalente de la producción de energía de nuestra Galaxia, la Vía Láctea, para la comunicación interestelar.

Conservación de la carga del barión

Ley que presenta la naturaleza según la cual la carga eléctrica neta de las partículas nucleares pesadas permanece inalterada en cualquier interacción.

Constante gravitatoria

Cantidad que expresa la fuerza de la atracción gravitatoria entre dos objetos de masa dada a una distancia dada.

Decímetro

Décima parte del metro, una longitud de onda típica en radioastronomía.

Dispersión

En la propagación de ondas electromagnéticas en un medio, la llegada de algunas frecuencias de radiación antes que otras frecuencias.

Distribución de Gauss

Curva de distribución normal en forma de campana, corriente en estadística.

Ecuación de estado

La relación que liga propiedades como la temperatura, la presión y la densidad de un material dado.

Efecto doppler

El cambio de frecuencia de la radiación electromagnética debido a un movimiento relativo a lo largo de la línea de visión entre transmisor y receptor.

Emisión de Planck

Espectro de emisión de la radiación electromagnética de un cuerpo negro perfecto, donde la emisión se debe a la temperatura de la fuente. Los espectros de emisión reales de objetos sólidos o gaseosos presentan espectros más complejos.

Enanas G

Estrellas aproximadamente como el Sol.

Enanas M

La mayoría de estrellas de menor masa y luminosidad que el Sol.

Ergio

Pequeña unidad de energía, comparable a la de una masa de 2 gramos que se moviera a una velocidad de 1 centímetro por segundo.

Espectro

Distribución de la radiación electromagnética según sus frecuencias; indica cómo el material absorbe o emite la radiación electromagnética en diferentes frecuencias.

ETI

Inteligencia extraterrestre.

Excentricidad

Desviación de una órbita planetaria o de otro tipo respecto a un círculo.

Exosfera

Las regiones más exteriores de una atmósfera planetaria desde las cuales se produce el escape al espacio.

Flujo

La cantidad de energía que atraviesa una superficie determinada en un tiempo determinado.

Fotones

Los componentes mínimos e irreductibles de la radiación electromagnética –luz de cualquier longitud de onda o frecuencia– que va desde los rayos gamma, los rayos X, la luz ultravioleta y la luz visible hasta la radiación infrarroja y las ondas de radio.

Gigaherzio (GHz)

Mil millones de herzios.

Herzio (Hz)

Un ciclo por segundo, unidad de frecuencia utilizada comúnmente en ingeniería eléctrica y radioastronomía.

Hidroxilo

Fragmento de molécula consistente en un átomo de oxígeno y otro de hidrógeno.

Interferómetro

Aparato que utiliza la interferencia de la luz para conseguir una elevada resolución espacial.

Isotrópico

Igual en todas direcciones.

Juegos de suma no nula

Juegos en los que las pérdidas netas no están equilibradas necesariamente por las ganancias netas. Por ejemplo, juegos donde todos ganan o pierden.

° K

Temperaturas en la escala absoluta o Kelvin. El cero absoluto es −273° centígrados. El fondo de cuerpo negro cósmico está a sólo unos pocos grados por encima de 0° K.

Kiloherzio (KHz)

1 000 herzios.

Kiloparsec

Mil parsecs.

Kilovatio

Mil vatios.

Lincos

Lenguaje propuesto para el contacto interestelar e inventado por el matemático holandés Hans Freudenthal.

Magnitud

Medida del brillo de una estrella. La emisión de luz de dos estrellas cuyo brillo difiere en cinco magnitudes en un factor de cien.

Megaherzio (MHz)

Un millón de herzios.

Megavatio

Un millón de vatios.

Micrón (μ o μm)

Una diezmilésima parte de centímetro, unidad usual en la medida de la longitud de onda de la radiación infrarroja.

Microondas

Ondas de radio cortas.

Microsegundo

Una millonésima de segundo.

Milisegundo

Una milésima parte de un segundo.

Mol

Masa numéricamente igual en gramos al peso molecular. Un mol contiene 6×10^{23} partículas.

Momento angular

Medida de la inercia de rotación; por ejemplo, la tendencia en mantener su rotación de un objeto que gira. El momento angular de una masa puntual es la masa por su velocidad por la distancia al centro de rotación.

Nanosegundo

Una milmillonésima de segundo.

Omnidireccional

Isotrópico

Orden de magnitud

Un factor de 10. Por ejemplo, tres órdenes de magnitud es 1 000 o 10^3.

Parsec

Distancia igual a 3,26 años-luz.

Paso de banda

El intervalo de frecuencias admitido por un receptor de radio o transmitido por un transmisor de radio. Los pasos de banda pueden ser de banda ancha o de banda estrecha.

Pleistoceno

Período geológico reciente, marcado por glaciaciones, y que empezó hace de dos a tres millones de años.

Polímero

Molécula de cadena larga, consistente en bloques constructivos simples denominados monómeros. Por ejemplo, las proteínas son polímeros de los aminoácidos y los ácidos nucleicos son polímeros de los nucleótidos.

Polipéptidos

Polímeros de cadena larga formada por aminoácidos, semejantes a proteínas.

Presión de vapor

Medida de la cantidad de gas que a una temperatura dada está en equilibrio con su condensación; como, por ejemplo, la cantidad de vapor de agua sobre el hielo a una temperatura dada.

Púlsar

Estrella de neutrones que gira rápidamente.

Quantos

Véase *Fotones*.

Quasar

«Fuente cuasi estelar.» En la mayoría de teorías, pero no todas, es una fase muy enérgica en la evolución de los centros de las galaxias.

Radiación del cuerpo negro cósmico a 3º K

La temperatura de un objeto en equilibrio en el espacio, detectada por primera vez en las radiofrecuencias. En la mayoría de teorías, pero no todas, se atribuye a los restos de radiación de la bola de fuego original a partir de la cual surgió el universo.

Ramjet interestelar

Aparato propuesto que utilizaría la materia del medio interestelar como combustible de trabajo y masa de reacción para los viajes interestelares.

Refractario

No volátil.

Relación señal-ruido

La cantidad de energía en la señal que estamos captando dividida por la cantidad de energía en las fuentes de ruido («estática») que nos impiden oír la señal. En la mayoría de las aplicaciones la detección exige una relación señal-ruido muy superior a 1.

Señal sinusoidal

Señal armónica simple, seno o coseno.

Sistema en fase

Conjunto de radiotelescopios conectados electrónicamente para que funcionen de modo colectivo.

Superconductor

Material que deja pasar la electricidad y el calor con una eficiencia casi perfecta.

Unidad astronómica (u.a.)

La distancia de la Tierra desde el Sol: 93 millones de millas o 150 millones de kilómetros.

Vatio

Diez millones de ergios por segundo.

$>$

Mayor que.

$<$

Menor que.

$\sim$

Del mismo orden de magnitud que.

Índice de intervenciones de los participantes

Se terminó de imprimir en offset
en el mes de agosto de 1984,
en los talleres gráficos de la
Compañía Impresora Argentina S.A.,
Alsina 2049, Buenos Aires, Argentina.